

Prairies et protéines : ne pas négliger le soufre !

Lambert R.

Centre de Michamps ASBL – Earth and Life Institute UCLouvain, Horritine, 3 – 6600 Bastogne (Belgique).
richard.lambert@uclouvain.be

Résumé

Le soufre intervient avec l'azote dans la composition des protéines. À la suite de la diminution importante des retombées atmosphériques de cet élément, des carences en soufre sont mises en évidence en Europe et en particulier en Belgique et en Wallonie. Dans ces situations, la fertilisation soufrée peut améliorer la production et la qualité des fourrages. Des indicateurs de risque de carence basés sur l'analyse du végétal et sur l'analyse de terre sont proposés, mais le diagnostic est peu précis et l'analyse de l'herbe donne une réponse à posteriori. Selon les résultats d'analyse de fourrage provenant de Wallonie, moins de 1/3 des échantillons de première coupe analysés contiennent suffisamment de soufre par rapport aux seuils recommandés d'un point de vue zootechnique et environ 25% des échantillons sont trop bas d'un point de vue phytotechnique. La fréquence des situations de carence phytotechnique, cependant encore assez faible (environ 2%), risque d'augmenter du fait de la diminution des retombées atmosphériques qui se poursuit. Par conséquent, afin d'assurer une production de fourrage riche en protéines de qualité et répondant aux besoins des animaux, nous recommandons d'évaluer régulièrement la situation du soufre sur la base des analyses de terre et de fourrage, surtout dans les situations à risques : sols légers, superficiels, pauvres en matière organique, fertilisation azotée minérale élevée, légumineuses...

Introduction

En production fourragère, lorsque l'on parle de protéines, on pense azote et légumineuses. L'azote est effectivement un élément constitutif important que l'on retrouve dans tous les acides aminés qui associés dans un ordre précis vont former les protéines. L'azote représente environ 16% du contenu élémentaire des protéines. Même si le soufre est classé en 8^{ème} position (en quantité) des éléments entrant dans la composition des organismes après O, C, H, N, Ca, P et K, il est important de rappeler que 2 des 20 acides aminés qui composent les protéines en contiennent. Il s'agit de la cystéine et de la méthionine. La méthionine est à la base de la structure de toutes les protéines car la biosynthèse d'une protéine commence généralement au niveau d'un codon d'initiation AUG sur l'ARNm codant la méthionine. La cystéine intervient notamment dans la fabrication du glutathion qui est un composé antioxydant présent dans les plantes, animaux et champignons. Les liaisons disulfures entre polypeptides jouent aussi un rôle très important dans l'assemblage et la structure des protéines. Par conséquent, une carence en cet élément peut limiter la synthèse des protéines et impacter le bon fonctionnement métabolique des êtres vivants.

Dans le sol, on trouve le soufre dans de nombreux minéraux, sous forme de sulfates et de sulfures, ainsi que dans la matière organique. Le rôle du soufre comme élément fertilisant essentiel à la croissance des plantes a longtemps été négligé car jusqu'à récemment les retombées atmosphériques de cet élément couvraient largement les besoins des principales cultures, à l'exception des crucifères et alliées qui sont particulièrement exigeantes en cet éléments car elles contiennent des composés soufrés non protéiques. Ces retombées atmosphériques proviennent de la combustion des énergies fossiles et d'événements naturels comme les éruptions volcaniques. Le soufre présent dans l'atmosphère, principalement sous forme SO₂, se transforme en acide sulfurique dans les précipitations et est à l'origine, avec d'autres composés, de la formation de pluies acides.

Depuis les années 80, en Europe occidentale, de nombreuses mesures ont été prises pour réduire les émissions de soufre dans l'atmosphère afin de réduire les problèmes environnementaux causés par les pluies acides, notamment le dépérissement des forêts : utilisation de carburants à faible teneur en soufre, désulfuration des fumées, expansion du nucléaire et désindustrialisation.... A titre d'exemple les émissions de soufre en Wallonie, ont diminué de 91% entre 1990 et 2014 (<https://www.wallonair.be/fr/en-savoir-plus/les-polluants/dioxyde-de-soufre-so2.html>).

Des carences en soufre ont commencé à apparaître un peu partout en Europe, à partir des années 80, sur différentes cultures et notamment en prairies (Zhao *et al.*, 2002 ; Murphy *et al.*, 1989). Les carences en soufre se marquent sur le rendement, mais également sur la teneur en protéines et la qualité des protéines. Une carence en soufre peut limiter également la synthèse des protéines entraînant une accumulation de composés azotés non protéiques dans la plante et même une diminution du recouvrement apparent de la fertilisation azotée et une augmentation de la lixiviation du nitrate (Aspel *et al.*, 2022 ; Brown *et al.*, 2000).

Au niveau de l'animal, le soufre joue également de nombreux rôles. Il entre dans la composition de nombreuses molécules importantes (insuline, glutathion, vit B1, vit B8,...), dans la kératine et les cartilages. Un apport de soufre dans la ration en complément minéral peut augmenter les productions animales dans certains cas. Selon Tisdale (1977), l'ingestion de soufre a permis un gain de poids et de production de laine chez des agneaux et une augmentation de production viandeuse et laitière, ainsi qu'une augmentation de teneur en protéines et en matières grasses du lait. L'apport de soufre augmente la digestibilité du fourrage, ainsi que la teneur en hydrates de carbones solubles (Tisdale, 1977). Chez la vache laitière, un rapport N:S inférieur à 10 dans la ration serait nécessaire pour ne pas limiter l'activité des micro-organismes du rumen (Triboi, 1998). L'acide aminé méthionine pourrait également être un acide aminé limitant pour des vaches laitières hautes productrices (Tisdale, 1977).

Malgré tous ces effets positifs, le soufre ne doit pas être appliqué en excès, même si en culture, la toxicité en soufre est plutôt rare. Cet élément est parfois appliqué en grande quantité pour acidifier le sol ou corriger la salinité sodique (Bole, 1986 ; Zhao *et al.*, 2018). Cependant, en alimentation animale, un excès de soufre peut entraîner la polyencéphalomalacie (nécrose du cortex cérébral) chez les ruminants (Olkowski A., 1997) et interférer avec certains oligo-éléments. Dans la ration, le soufre en excès est souvent apporté par l'eau de boisson ou certains aliments comme les pulpes de betteraves et des drêches de brasserie.

Pour l'alimentation des vaches laitières, la recommandation est de ne pas dépasser 0,4% en matière sèche (NRC, 2001). Un excès de fertilisation soufrée peut aussi amplifier des carences en certains oligo-éléments comme le Zn et le Se (Stroud, 2010 ; Murphy & Quirke, 1997), ou encore en cuivre (Cu), en présence de molybdène (Lamand *et al.*, 1998). L'effet antagoniste avec le Se peut être particulièrement dommageable pour les bovins étant donné la fréquence élevée des carences en sélénium (Se) observées en Wallonie (Mehdi *et al.*, 2014).

Cet article synthétise les résultats obtenus en Wallonie dans le cadre d'études sur le rôle et la situation du soufre pour la production fourragère.

Effet du soufre sur la production des prairies

En Belgique, des essais portant sur l'intérêt de la fertilisation soufrée sur la quantité et le rendement des prairies de fauche ont été suivis par l'UCLouvain et le Service Pédologique de Belgique entre 2001 et 2004, sur 7 sites différents. Cela correspond à 18 situations « site x année » différentes. Les sites ont été choisis sur base de critères de risques d'avoir une carence (sols superficiels ou légers, pauvres en matière organique et éloignés des zones industrielles). Dans ces essais, trois niveaux de fertilisation azotée sont croisés avec trois ou cinq niveaux de fertilisation soufrée. Le niveau moyen de fertilisation azotée est de 80 à 100 kg/ha par coupe. Le niveau faible est de 50% du niveau moyen et le niveau élevé est 130% du niveau moyen. Pour le soufre, les doses sont 0-20-50 kg SO₃/coupe ou 0-10-20-30-50 kg SO₃/coupe selon que l'on a un dispositif à 3 ou 5 niveaux. Le soufre est apporté sous forme K₂SO₄ ou MgSO₄, selon qu'il y a besoin de potassium ou pas. Le cas échéant, la fertilisation potassique a été calculée en tenant compte de l'apport de K par le K₂SO₄.

Le plan expérimental est un bloc aléatoire complet avec 4 répétitions. Des effets significatifs positifs de la fertilisation soufrée ont été observés dans 4 situations sur les 18, soit dans 20% des situations et sur 14% des 51 coupes réalisées (Mathot *et al.*, 2008). Des effets du soufre sont principalement observés sur les sites dont le sol est sableux, en première et troisième coupe et seulement sur les traitements doses élevées et moyennes d'azote. L'augmentation de production sur ces sites restait cependant limitée, entre 0.2 et 1.2 tonne de MS/ha avec une moyenne de 0.8 tonne, soit 6% seulement d'augmentation de rendement. Dans d'autres études européennes (figure 1), la réponse de la production à l'apport de soufre peut-être beaucoup plus importante et atteindre 2 à 6 tonnes/ha (Murphy & Quirke, 1997 ; Grygierzec B. *et al.*, 2015 ; Zhao *et al.*, 2003 ; Aspel *et al.*, 2022). Sur la figure 1, tirée de Murphy & Quirke (1997), la perte de production causée par la carence en S atteint 40% du rendement potentiel avec un niveau très intensif de fertilisation azotée. Dans cet exemple, même à un niveau d'intensification moins élevé, la fertilisation soufrée permet une production supérieure au témoin sans soufre.

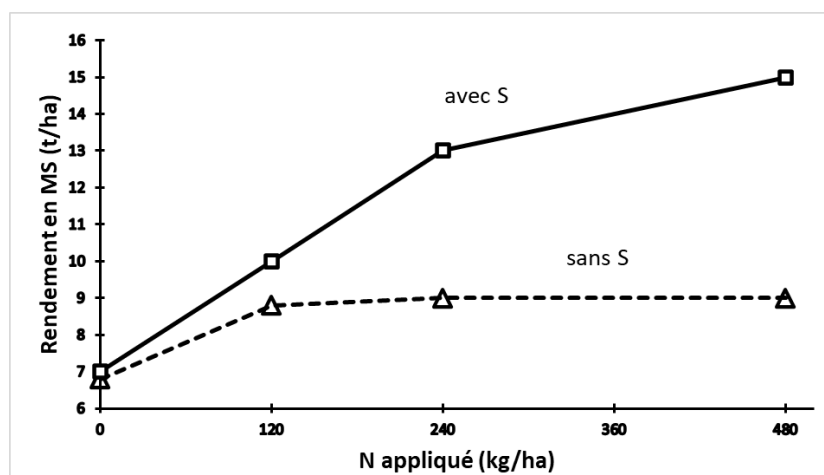


FIGURE 1 : Effet du soufre (25 kg/ha) sur le rendement de l'herbe pour différents niveaux de fertilisation azotée (Murphy & Quirke, 1997)

Effets sur la qualité du fourrage

La fertilisation soufrée influence également la qualité du fourrage (Murphy & O'Donnell, 1989 ; Mathot *et al.*, 2008). Elle augmente la teneur en S et diminue le rapport N:S du fourrage. Certains auteurs ont observé des effets marqués de la déficience en S sur la synthèse des protéines (Bolton *et al.*, 1976), pouvant entraîner une accumulation de nitrate dangereux pour le bétail (Nicholls & Miles, 1980). Dans nos essais, lorsque la fertilisation a eu un effet sur le rendement, on n'a pas observé d'effets significatifs sur la teneur en protéines du fourrage produit. Mais la production de protéines par hectare est augmentée du fait de l'augmentation de rendement. Cette augmentation a été de 190 kg de protéines/ha en moyenne, soit environ 10% (Mathot *et al.*, 2004).

Des analyses de la teneur en acides aminés du fourrage de la première coupe d'un essai mené à Bocholt en Flandre en 2002 ont été réalisées en collaboration avec R. Agneessens du CRAW. Dans cet essai, la carence en soufre était très marquée et la fertilisation soufrée (20 unités/coupe) avait permis une production en première coupe de 1,2 T de MS/ha supérieure au témoin sans S. La proportion d'acide aspartique diminue de 38%, alors que la proportion de méthionine, acide aminé soufré, augmente de 12% (Mathot *et al.*, 2003). La méthionine, la lysine, l'histidine et la leucine sont cités comme parfois limitant pour la production laitière (Rulquin *et al.*, 2001). La qualité des protéines peut donc être améliorée par un apport de soufre en situation carencée.

Nous avons également analysé 27 échantillons de fourrage provenant du Sud-Est de la Belgique pour la teneur en N entrant réellement dans la composition des protéines analysé par la méthode Stutzer (précipitation à l'hydroxyde de cuivre, filtration et détermination de l'azote sur filtre) et en azote total analysé par la méthode Kjeldahl (Lambert *et al.*, 2003). Comme mentionné par Baker *et al.* (1973), on observe une corrélation positive significative entre l'azote non-protéique (ANP) soluble calculé comme étant la différence entre N dosé par la méthode Kjeldahl et N dosé par la méthode Stutzer et le rapport N:S du fourrage. La relation entre ANP et la teneur en S ou en N n'est pas significative. Cela indique qu'un rapport N:S élevé peut limiter la synthèse protéique et entraîner l'accumulation d'azote non protéique.

La teneur en azote non protéique est supérieure dans les ensilages par rapport aux herbes fraîches et aux foin, probablement à la suite de la dégradation d'une partie des protéines lors du processus d'ensilage.

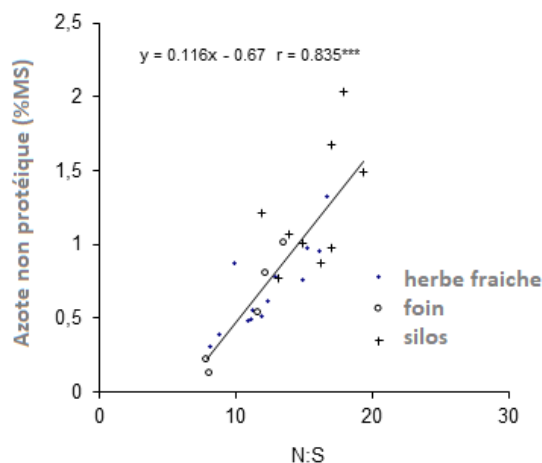


FIGURE 2 : Relation entre teneur en azote non-protéique et rapport N:S (Lambert *et al.*, 2003)

Des essais d'ensilage en micro-silos (2.5 litres ; 60 jours) ont été réalisés sur des fourrages avec et sans fertilisation soufrée. Des effets significatifs de la fertilisation soufrée ont été observés dans un essai sur cinq, sur les paramètres de conservation de l'ensilage. On observe un pH inférieur et un rapport NH_3/N plus faible dans les micro-silos des fourrages ayant reçu une fertilisation soufrée. Le rapport azote ammoniacal/azote total indique l'état de dégradation des protéines de l'ensilage et représente donc un test d'appréciation du niveau de conservation de celles-ci (Vanbelle *et al.*, 1981). Une hypothèse est que le soufre pourrait dans certains cas être limitant pour le développement des bactéries lactiques.

Cependant, l'excès de soufre peut à l'inverse entraîner des conséquences négatives sur la qualité du fourrage, par suite de l'antagonisme avec certains oligo-éléments comme le zinc, le cuivre et surtout le sélénium (Singh *et al.*, 1980) qui joue un rôle important en physiologie animale. Dans ce cas, un excès de soufre peut entraîner une diminution de l'absorption de ces oligo-éléments.

Chez les légumineuses, le soufre joue également un rôle majeur sur la fixation symbiotique de l'azote (Becana *et al.*, 2018 ; Scherer, 2008). Les besoins en soufre des légumineuses sont supérieurs à ceux des graminées. En condition de limitation de la disponibilité en soufre, pour un mélange légumineuses-graminées, les légumineuses sont moins compétitrices que les graminées ce qui peut réduire leur proportion dans le couvert (Tallec *et al.*, 2008). Dans les associations ray-grass trèfle blanc, l'augmentation de la disponibilité de S entraîne généralement une augmentation de teneur en N, en particulier à des disponibilités de N faibles et intermédiaires, et même une augmentation significative du rendement de N pour L.perenne. Dans ce cas, l'effet S peut être indirect et lié à la haute performance de T. repens qui pourrait alors être bénéfique pour les espèces de graminées grâce à un transfert d'azote plus élevé de T. repens (Tallec *et al.*, 2008).

La teneur en S de couvert mono-spécifique de légumineuses est généralement supérieure à celle des graminées. La luzerne a besoin d'un rapport N:S de 11 à 12 pour une production maximale de protéine (Aulakh *et al.*, 1976), alors que, pour les graminées, un rapport N:S de 14 est généralement satisfaisant.

Effets sur les productions animales

Au niveau zootechnique, Une présence insuffisante en soufre peut constituer un facteur limitant à la synthèse d'acides aminés à partir d'azote non protéique. Le besoin en S des micro-organismes du rumen est estimé entre 2.5 et 3.1 g/kg matière organique digestible (Durand et Komisarczuk, 1988), ce qui représente un apport d'environ 2 g/kg MS. Lorsque l'apport protéique est en partie effectué à l'aide d'urée, l'apport en S est réduit. De ce fait, il faut ajouter 30 - 40 g S /kg d'urée supplémentée (Schlegel P., 2021). L'ensilage de maïs contient en général peu de soufre. Sa teneur est comprise entre 0.05 et 0.1 %. Si la ration contient beaucoup d'ensilage de maïs, le risque est donc élevé d'avoir trop peu de soufre dans l'alimentation.

En Ecosse, le Farm Advisory Service fixe les seuils de carences à une valeur N:S de 13 et une teneur en S de minimum 0.25% de la MS (Crooks *et al.*, 2017). Tisdale (2002), dans sa revue bibliographique des rôles du soufre sur la qualité des fourrages et la nutrition des ruminants cite de nombreux effets positifs sur :

- la qualité des fourrages (teneur en vitamine A de la luzerne, le contenu en chlorophylle du trèfle rouge (*Trifolium pratense*), le contenu en protéines des graminées et légumineuses, diminution du rapport N:S des fourrages, diminution du contenu en azote non protéique de l'herbe, augmentation de la qualité des protéines de la luzerne)

- sur l'activité des microorganismes du rumen et la digestibilité de la cellulose, de l'amidon
- sur les performances animales des moutons, des bovins allaitants et laitiers

Identifier les carences en S

Nous allons maintenant considérer les seuils de carence selon que l'on se place du point de vue des besoins de l'herbe (carence phytotechnique) ou du point de vue des besoins de l'animal (carence zootechnique).

Carence phytotechnique par l'analyse du végétal

Visuellement, une carence en soufre peut facilement être confondue avec une carence en azote et se manifeste par un jaunissement des feuilles. Ce symptôme visuel n'apparaît que lorsque la carence est très marquée avec une diminution de rendement de l'ordre de 30%.

Dans le cadre de l'étude de l'UCLouvain mentionnée précédemment, un indicateur de déficience en soufre basé sur la teneur en azote et en soufre total de l'herbe a été proposé (Mathot *et al.*, 2009).

La représentation graphique des teneurs en N et S de fourrages carencés en S et de fourrages non carencés, fait apparaître 3 zones délimitées par 2 droites (figure 3) dont les équations sont :

$$S = 0.0619 N + 0.2894 \quad (\text{Eq 1}) \text{ (ligne continue sur figure 3)}$$

$$S = 0.0665 N - 0.2805 \quad (\text{Eq 2}) \text{ (ligne pointillée sur figure 3)}$$

Avec S et N qui indiquent les teneurs respectives exprimées en mg/g.

Si $S > (0.0619 N + 0.2894)$ il n'y a pas de carence en soufre (points situés au-dessus de la ligne continue sur la figure 3)

Si $(0.0619 N + 0.2894) < S < (0.0665 N - 0.2805)$ il y coexistence de situations avec et sans carences (points situés entre la ligne continue et la ligne pointillée de la figure 3)

$S < (0.0665 N - 0.2805)$ il y a une carence certaine en soufre (points situés sous la ligne pointillée de la figure 3)

Pour une teneur en azote moyenne des ensilages de 22 mg de N par g, ces limites correspondent à des valeurs de rapport N:S de 13,3 et 18,6. Pour de l'herbe jeune au stade pâturage avec une teneur en azote de 30 mg de N/g, les limites sont 13,9 et 19. De façon pragmatique, on peut considérer qu'il y a un risque de carence « phytotechnique » lorsque N:S est supérieur à 13 pour l'ensilage d'herbe et 14 pour l'herbe pâturée.

L'analyse de terre

L'intérêt de l'analyse de sol pour évaluer le risque de carence a été étudiée par Mariage *et al.* (2021) à partir d'analyses simultanées de terre et fourrages provenant de 233 prairies Wallonnes, entre 2018 et 2020.

En Wallonie, la méthode utilisée pour les analyses de terre est la méthode de Lakanen et Ervio (1971) qui utilise une solution d'extraction composée d'acétate d'ammonium + EDTA à pH 4,65.

En France, pour le dosage du soufre dans le sol, c'est la méthode Scott qui est utilisée. Cette méthode extrait une partie du soufre organique, réputée facilement disponible pour la plante, au moyen d'une solution de phosphate mono potassique.

La comparaison des 2 méthodes montre une excellente corrélation ($y=1.00 x$; $r^2=0.92$) (Mariage *et al.*, 2021).

La relation entre la teneur en S extrait du sol et l'indice de nutrition en S du fourrage n'est pas très bonne. Cependant, on constate qu'au-delà de 30 mg de S par kg de terre sèche, l'indice de nutrition soufrée iS est toujours supérieur à 100 et toujours supérieur à 80 au-delà de 20 mg de S/kg de terre sèche. En dessous de 20 mg de S/kg de terre sèche, la probabilité d'avoir un fourrage carencé en soufre ($iS < 100$) est de 37% dans notre échantillon. La probabilité d'avoir un fourrage fortement carencé ($iS < 80$) est de 11%. Entre 20 et 30 mg de S/kg de terre sèche, la probabilité d'avoir un fourrage carencé est de 24%. Ces seuils de 20 et 30 mg de S/kg de terre sèche, bien qu'imparfaits, sont proposés pour évaluer le risque d'apparition de carence sur base de l'analyse de terre (Mariage *et al.*, 2021). Le diagnostic pourrait sans doute être amélioré en analysant également les horizons sous-jacents, car il a été montré pour la culture de blé, en Belgique, qu'en cours de culture, le soufre des horizons inférieurs pouvait expliquer l'absence d'apparition de carences (Verlinden, 2002).

TABLEAU I. Grille d'évaluation du risque de carence en soufre en prairie sur base de l'analyse de terre

Teneur en soufre du sol (mg de S/kg terre sèche)	Risque de carence forte ($iS < 80$)	Risque de carence modérée ($80 < iS < 100$)	
>30	0%	0%	Pas de risque
$20 < S < 30$	0%	19%	Risque modéré
<20	11%	27%	Risque élevé

Carence zootechnique

Selon Tisdale (2002), le niveau adéquat conseillé dans la ration est de 0,2 à 0,25% de S et un rapport N:S entre 10 :1 et 12 :1.

L'analyse de l'herbe (contenu en S et rapport N:S) permet d'identifier les carences. Pour l'alimentation animale, cette carence peut être corrigée par un complément de soufre, même sous forme minérale dans la ration. Cependant, au niveau de la prairie, il est intéressant de pouvoir anticiper cette carence, par l'application d'une fertilisation soufrée si besoin.

Situation du soufre en Wallonie

Sur base des limites établies par Mathot *et al.* (2009) pour les seuils de carence phytotechnique et sur base des seuils de carence zootechnique (Tisdale, 2002), nous avons évalué la situation du soufre en Wallonie à partir d'analyse d'herbe et de fourrage (figure 3). Depuis 2008, le Centre de Michamps analyse le soufre contenu dans

un échantillon représentatif des premières coupes de fourrages récoltés en Province de Luxembourg afin de déterminer la fréquence des situations de carence. Des échantillons d'herbe (premier cycle au printemps) ont aussi été prélevés par les équipes des centres d'action Protect'eau et analysés par le laboratoire du Centre de Michamps, dans différentes régions de Wallonie. Cet échantillonnage n'est pas aléatoire et ne couvre pas toutes les régions agricoles.

Au total, 790 échantillons d'herbe ont été analysés depuis 2008. Les échantillons de 2008 à 2017 proviennent exclusivement de la Province de Luxembourg et ceux à partir de 2018, de différentes régions de la Wallonie. Il s'agit exclusivement d'échantillons prélevés au printemps.

Les résultats varient fortement d'une année à l'autre, probablement en fonction des retombées atmosphériques, des conditions météorologiques plus ou moins favorables à la minéralisation et à la lixiviation et des besoins des plantes, qui dépendent de la croissance. Le rapport N:S moyen le plus bas (9,3) est observé en 2016 et le plus élevé (13,4) en 2012. En moyenne, sur les 13 années de suivi, le rapport N:S était de 11,6. Septante-cinq pourcent des échantillons se trouvent dans la zone du graphe « teneur S en fonction de teneur N » correspondant à une nutrition soufrée certainement suffisante au point de vue phytotechnique (zone située au-dessus de la droite continue). Moins de 2% des échantillons analysés sont dans la zone « certainement déficient au niveau phytotechnique » (zone située en-dessous de la ligne pointillée). Il s'agit surtout d'échantillons avec une teneur élevée en azote. Mais, la zone d'incertitude (entre la droite continue et la droite pointillée) contient 23% des échantillons, soit près de 1/4. Cependant, si on prend en compte les normes pour les animaux, il faut rechercher un rapport N:S inférieur à 12 et une teneur en S comprise entre 0.2 et 0.4 %. Si on considère simultanément ces 2 critères zootechniques (teneur S et rapport N:S), seulement 31 % des échantillons sont corrects (trapèze grisé). Seulement 1% des échantillons analysés dépassent le seuil de toxicité fixé à 0,4% de S. Selon les seuils conseillés en Ecosse par le Farm Advisory Service ($N:S < 13$ et $S > 0.25\%$ de la MS) (Crooks *et al.*, 2017), seulement 12% des échantillons wallons seraient suffisamment pourvus en S.

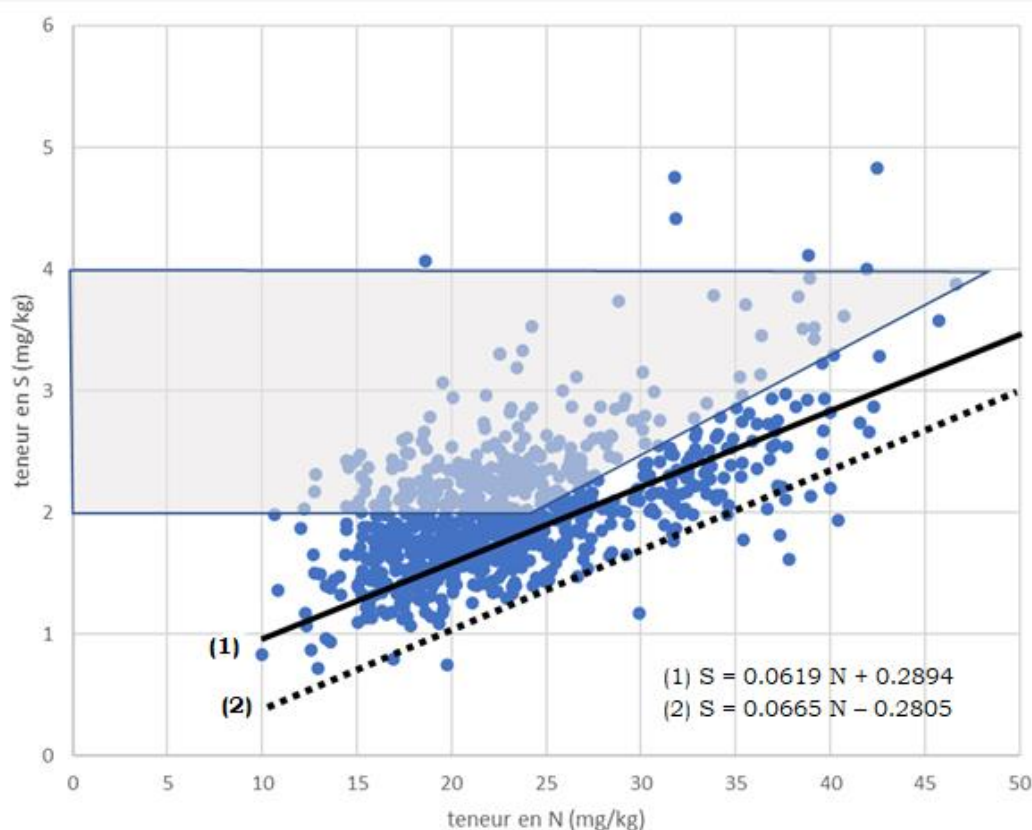


FIGURE 3 : Teneurs en azote et soufre des fourrages wallons et seuils de carence phytotechnique (lignes continues et pointillées) et zootechnique (surface grisée)

Corriger les carences

La disponibilité du S augmente généralement avec le contenu en matière organique du sol, et donc le maintien d'un taux correct d'humus par des apports réguliers d'engrais organique est important pour assurer une alimentation suffisante. Les engrais de ferme contiennent des quantités importantes de soufre. Cependant, le soufre contenu dans les engrais de ferme n'est pas très disponible. A quantité égale de soufre, l'efficacité mesurée sur une prairie exploitée pour ensilage est environ la moitié de celle du gypse (Lloyd, 2006). Si le fumier est stocké dans des conditions anaérobies pendant plusieurs mois, il existe un risque considérable de

transformations microbiennes du sulfate en soufre organique et en composés gazeux qui peuvent être perdus par volatilisation. Dans cette situation, la disponibilité du soufre au cours de l'année d'application peut être trop faible pour être prise en compte (Eriksen, 2002).

Le soufre peut également être apporté par des engrais minéraux ou des sous-produits comme les résidus de désulfuration des fumées. Les superphosphates normal et concentré sont obtenus par attaque de phosphate naturel par l'acide sulfurique qui réagit pour donner du sulfate de calcium. On trouve également des engrais à base de sulfate d'ammoniac et de sulfate de potasse. On peut aussi l'apporter sous forme de gypse, de phosphogypse ou encore de soufre élémentaire.

Dans nos essais, l'application de 20 kg SO₃/coupe (soit environ 1 unité de S pour 5 unités d'azote appliquée) a été suffisante.

Conclusion

Des carences en soufre ont été mises en évidence en Europe et en particulier en Belgique et en Wallonie. Dans ces situations, un apport en soufre augmente la production et la qualité des fourrages. L'importance du soufre pour le maintien du trèfle et la fixation symbiotique d'azote a également été mise en évidence dans plusieurs études. Le diagnostic par l'analyse de terre et l'analyse de l'herbe permet de mettre en évidence des situations de carence potentielle, mais, l'analyse de terre est peu précise et l'analyse de l'herbe donne une réponse à posteriori, donc peu intéressante pour les gestionnaires. Selon les résultats d'analyse de fourrage provenant de Wallonie, moins de 1/3 des échantillons de première coupe analysés contiennent suffisamment de soufre par rapport aux seuils recommandés d'un point de vue zootechnique et environ 25% des échantillons sont également trop bas d'un point de vue phytotechnique. Des carences phytotechniques certaines sont cependant encore assez limitées (environ 2%), mais leur fréquence risque d'augmenter du fait de la diminution des retombées atmosphériques en soufre.

Sur la base de notre expertise et des travaux mobilisés dans cette étude, nous recommandons d'évaluer régulièrement la situation via des analyses de terre voire de fourrages ; et ce d'autant que l'on se trouve dans des situations à risques : sols légers, superficiels, pauvres en matière organique, fertilisation azotée minérale élevée, légumineuses...

Cependant, les apports doivent rester modérés pour ne pas induire d'autres carences comme dans le cas du sélénium. Les engrais de ferme et certains engrais minéraux phosphatés, potassiques apportent également du soufre dont il faut tenir compte.

Références Bibliographiques

- ASPEL C., MURPHY P. N. C., MCLAUGHLIN M. J., & FORRESTAL P. J. (2022). « Sulfur fertilization strategy affects grass yield, nitrogen uptake, and nitrate leaching: a field lysimeter study ». *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185, 209–220.
- AULAKH MS, DEV G, ARORA BR. (1976). «Effect of sulphur fertilization on the nitrogen-sulphur relationships in alfalfa (Medicago sativa L. Pers.) », *Plant and Soil* 45, 75–80.
- BAKER A.S., MORTENSEN W.P. AND DERMANIS P. (1973). «The effects of N and S fertilization on the yield and quality of orchardgrass », *Sulphur Inst. J.* 9(1): 14-16.
- BECANA M., WIENKOOP S. AND MATAMOROS M.A. (2018). « Sulfur Transport and Metabolism in Legume Root Nodules », *Front. Plant Sci.* 9:1434.
- BOLE, J. B. (1986). « Amelioration of a calcareous Solonchak soil by irrigation, deep ripping, and acidification with elemental sulfur ». *Can. J. Soil Sci.* 66:347-356.
- BOLTON, J. NOWAKOWSKI, T.Z. AND LARAZUS, W. (1976). « Sulphur nitrogen interaction affects on the yield and composition of protein-N, non-protein N and soluble carbohydrates in perennial ryegrass ». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 27: 553-560.
- BROWN L., SCHOLEFIELD D., JEWKES E. C., PREEDY N., WADGE K., & BUTLER M. (2000). « The effect of sulphur application on the efficiency of nitrogen use in two contrasting grassland soils », *The Journal of Agricultural Science*, 135(2), 131-138.
- CROOKS B., SINCLAIR A., EDWARDS T., (2017), « Sulphur recommendations for crops ». *Technical Note TN685. Farm Advisory Service.*
- DURAND M AND KOMISARCZUK S., (1988). « Influence of major minerals on rumen microbiota », *Journal of Nutrition* 118, 249–260.
- ERIKSEN J., (2002). « Organic manures as sources of fertiliser sulphur ». *Proceedings No. 505, International Fertiliser Society York UK 20 pp.*
- GRYGIERZEC B., SZEWCZYK W., MUSIAL K., (2015). « Effect of sulphur fertilization on the rate of photosynthesis and yield of *Lolium x boucheanum* Kunth cultivated in monoculture and mixture with *Trifolium repens* L. », *In Grassland Science in Europe, Vol. 20 – Grassland and forages in high output dairy farming systems. Proceedings of the 18th Symposium of the European Grassland Federation Wageningen, the Netherlands 15-17 June 2015 Edited by A. van den Pol-van Dasselaar H.F.M. Aarts A. De Vliegher A. Elgersma D. Reheul J.A. Reijneveld J. Verloop A. Hopkins - Wageningen, 2015.*
- LAKANEN E. & ERVIÖ R., (1971). « A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soils ». *Acta Agraria Fennica*, 123, 223-232.
- LAMAND M., C. LAB, M. MIGNON, J. C. TRESSOL., (1988). « Interférence du soufre et du molybdène avec le métabolisme du cuivre et du zinc chez l'agneau ». *Reproduction Nutrition Développement*, 1988, 28 (1), pp.201-202.
- LAMBERT R., MATHOT M., TOUSSAINT B. AND PEETERS A. (2003). « Grass sulphur status and non-protein nitrogen accumulation: a preview in the South-East part of Belgium ». *Sulphur Transport and Assimilation in Plants, 2003, pp. 257-259.*

- LLOYD A., (2006). « Effectiveness of cattle slurry as a sulphur source for grass cut for silage ». *Grass and Forage Science* 49(2):203 – 208
- MARIAGE C., CUGNON T., COLINET G., (2021). « Comparaison de méthodes d'analyse du soufre dans les sols et liens avec les indices de nutrition des fourrages ». *15ème Rencontres Comifer-Gemas 24-25 nov 2021 – Clermont-Ferrand*.
- MATHOT M., LAMBERT R., MERTENS J., AGNEESESENS R., TOUSSAINT B., PEETERS A., (2003). « Effects of nitrogen and sulphur fertilizations on amino acid composition of field grown perennial ryegrass (*Lolium perenne*) ». In *Book of abstracts, final COST829 Meeting. Progress in sulphur research. 1997-2003. Braunschweig, Germany, 29*.
- MATHOT M., LAMBERT R., MERTENS J., TOUSSAINT B. AND PEETERS A., (2004). « Effect of sulphur fertilisation on Belgian grasslands ». *Grassland Science in Europe* vol 9 : 699-701
- MATHOT M., MERTENS J., VERLINDEN G., LAMBERT R., (2008). « Positive effects of sulphur fertilisation on grasslands yields and quality in Belgium ». *European Journal of Agronomy* 28 (4), 655–658.
- MATHOT M., THÉLIER-HUCHÉ L. AND LAMBERT R., (2009). « Sulphur and nitrogen content as sulphur deficiency indicator for grasses ». *Europ. J. Agronomy* 30 (2009) 172–176
- MEHDI Y., CABARAUX J-F., HORNICK J-L., ISTASSE L., DUFRASNE I. (2014). « Selenium status in cattle herds in Wallonia (Belgium): overview and health management », *VeterinaryWorld* 7(12): 1144-1149.
- MURPHY, M. D., AND T. O'DONNELL., (1989) « Sulphur Deficiency in Herbage in Ireland: 2. Sulphur Fertilisation and Its Effect on Yield and Quality of Herbage », *Irish Journal of Agricultural Research*, vol. 28, no. 1, pp. 79–90.
- MURPHY, M. D., & QUIRKE, W. A. (1997). « The Effect of Sulphur/Nitrogen/Selenium Interactions on Herbage Yield and Quality », *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 36(1), 31–38.
- NICHOLLS, T. J. AND MILES, E.J. (1980). « Nitrate/nitrite poisoning of cattle on ryegrass pasture ». *Australian Veterinary Journal* 56: 95-96.
- NRC, (2001). « Nutrient requirements of dairy cattle », *7th Revised Edition, Subcommittee on Dairy Cattle Nutrition, Committee on Animal Nutrition, Board on Agriculture and Natural Resources, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.*
- OLKOWSKI A.A., (1997). « Neurotoxicity and secondary metabolic problems associated with low to moderate levels of exposure to excess dietary sulphur in ruminants: a review », *Vet. Hum. Toxicol.* 39(6):355-360.
- RULQUIN H., VERITE R., GUINARD-FLAMENT J., PISULEWSKI P. M., (2001). « Acides aminés digestibles dans l'intestin . Origines des variations chez les ruminants et répercussions sur les protéines du lait », *INRA Prod. Anim.*, 14(3), 201-210.
- SCHERER H.W. (2008). « Impact of Sulfur on N2 Fixation of Légumes », In: Khan, N.A., Singh, S., Umar, S. (eds) *Sulfur Assimilation and Abiotic Stress in Plants. Springer, Berlin, Heidelberg*.
- SCHLEGEL P., (2021). « Minéraux et vitamines ». Dans: *Apports alimentaires recommandés pour les ruminants (Livre vert), chapitre 4, Ed. Agroscope, Posieux*.
- SINGH M., SINGH N., BHANDARI D.K., (1980). "Interaction of selenium and sulphur on the growth and chemical composition of raya », *Soil Sci.* 129, 238-244.
- STROUD J.L., ZHAO F.J., BUCHNER F., SHINMACHI F., MCGRATH S.P. (2010). « Impacts of sulphur nutrition on selenium and molybdenum concentrations in wheat grain », *Journal of Cereal Science*, 2010, 52 (1), pp.111-113.
- TALLEC T., DIQUELOU S., FAUVEAU C., BATAILLE M. P., & OURRY A. (2008). « Effects of nitrogen and sulphur gradients on plant competition, N and S use efficiencies and species abundance in a grassland plant mixture », *Plant and Soil*, 313(1–2), 267–282.
- TISDALE, (1977). « Sulphur in forage quality and ruminant nutrition », *The Sulphur Institute, technical bulletin* 22.
- TRIBOÏ E., (1988). « Equilibre des nutriments soufrée et azotée en prairies, de cultures fourragères et annuelles en moyenne montagne du Massif Central », *Fourrages* 114, 177-192.
- VANBELLE M., ARNOULD R., DESWYSEN A., MOREAU I., (1981). « L'ensilage, un problème d'actualité. I.R.S.I.A. Comité pour l'étude de l'alimentation du bétail », *Comité pour l'Etude de l'Alimentation du Bétail, Section Ensilage*. 89 p.
- VERLINDEN G., (2002). « Sulfur dynamics in belgian agricultural soils », *Doctoral Thesis. Doctoraatsproefschrift Nr. 506 aan de Faculteit Landbouwkundige et Toegepaste Biologische Wetenschappen van de K.U.Leuven*.
- ZHAO F.J., MCGRATH S.P., BLAKE-KALFF M.M.A., LINK A., TUCKER M., (2002). « Crop responses to sulphur fertilisation in Europe », In: *Proceedings No. 504, International Fertiliser Society, York*.
- ZHAO Y., WANG S., LI Y., LIU J., ZHUO Y., ZHANG W., WANG J. & XU L., (2018). « Long-term performance of flue gas desulfurization gypsum in a large-scale application in a saline-alkali wasteland in northwest China ». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 261, 115–124.