

# DIAGNOSTIC DE DÉFICIENCES EN SOUFRE EN PRODUCTION HERBAGÈRE

Lambert R. et Mathot M.

## 1. Introduction

### 1.1. *Le soufre*

Le soufre est un élément essentiel pour les animaux et végétaux. Il contribue notamment à la composition de certains acides aminés (méthionine et cystéine), unités constitutives des protéines. En culture, des quantités variables de soufre sont prélevées par les plantes, allant d'environ 10 kg de S/ha/an pour les céréales jusqu'à 45 kg/ha/an par les crucifères (Aulak, 2003). Le soufre est principalement prélevé par les plantes sous forme de sulfate à partir de la solution du sol. Sous cette forme il est aussi fort mobile et susceptible d'être lessivé hors de la zone de prélèvement par les plantes. La part du soufre présent dans le sol sous cette forme utilisable par les plantes est généralement relativement faible et fort variable ce qui rend assez délicat l'établissement de conseils de fertilisation à partir d'analyse de sol pour cet élément (McGrath et al., 1996). C'est pourquoi le diagnostic de nutrition soufrée repose généralement sur les analyses de plantes (Blake Kalff et al., 2002). Jusqu'il y a une vingtaine d'année, la fertilisation soufrée était peu considérée (McGrath et al., 1996) car les apports via les retombées atmosphériques étaient importants. Maintenant, l'utilisation de fertilisants plus « purs », pauvres en soufre (Ceccotti, 1996) et la diminution des retombées atmosphériques en cet élément en Europe (- 84 % Europe depuis 1980, EMEP 2011) suite aux mesures prises pour réduire les émissions, conduisent à l'observation de déficiences en soufre de plus en plus fréquentes (Zhao et al., 2002) notamment en prairies. De façon générale, si on estime qu'annuellement entre 20 et 30 kg de S sont exportés, par hectare, en prairie de fauche, et que 10 kg de S par hectare retombent sur les surfaces agricoles et que de surcroît, durant l'hiver, une part du S minéralisé par le sol est lessivé (Whitehead, 2000) on obtient un bilan annuel négatif en soufre à l'échelle de la parcelle. A court terme, ce bilan négatif n'est toutefois pas nécessairement synonyme de carence en S car le sol peut fournir de plus ou moins grandes quantités de S que ce soit par minéralisation ou remontée capillaire durant la période de croissance (Verlinden, 2002).

### 1.1. *La prairie et le soufre*

Depuis la fin des années nonante, des déficiences en soufre sont mises en évidence en prairies de fauche d'Europe de l'ouest (Zhao et al., 2002, Mathot et al., 2008). Ces déficiences ont des conséquences sur le rendement mais également sur la qualité du fourrage. En effet, en situation de déficience, un apport en S permet un accroissement des rendements mais aussi de la concentration en soufre, de la teneur en protéines (Bolton et al., 1976) et de la proportion en acides aminés soufrés dans ces protéines (Mathot et al., 2003, Mathot et al., 2008). Ces aspects qualitatifs sont importants pour les productions animales pour lesquelles on conseille des teneurs en S supérieures à 1.5 à 2 g/kg de MS dans les rations respectivement de bovins viandeux et laitiers avec un maximum de 4g/kg MS (NRC, 2001). Il a également été montré que la teneur en méthionine des rations peut être limitante pour les productions bovines (Tsidale, 1977).

Une des spécificités des prairies, qu'elles soient fauchées ou pâturées, temporaires ou permanentes c'est que le couvert peut être mono ou multi-espèces. Les prairies multi-espèces peuvent être soit composées uniquement de graminées ou de graminées et de légumineuses ce qui induit un facteur supplémentaire lorsque l'on considère la nutrition soufrée des prairies. En effet, Metson et al., (1978) ont montré que, dans un couvert mixte composé de trèfle blanc et de graminées, le trèfle blanc est plus riche en azote, mais plus pauvre en soufre. D'autre part, 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). La teneur en soufre de graminées à un niveau de croissance semble généralement similaire

(Metson, 2000) même si des différences entre espèces ont été mise en évidence (Salette, 1978). Par contre, la teneur en S de couvert mono-spécifique de légumineuses est généralement supérieur à celle des graminées (Mayland and Wilkinson, 1996). Outre l'effet du type d'espèce dans le couvert, il a été montré que la teneur en soufre d'une prairie varie en fonction de la croissance. En effet, Salette (1978) a montré pour deux graminées différentes (fétuque et dactyle) que la teneur en soufre diminue au cours de la croissance. Cette diminution suit une courbe similaire à celle proposée pour l'azote et serait liée à l'augmentation relative des parois au détriment du contenu cellulaire du couvert.

## **1.2. Evaluer l'intérêt d'appliquer une fertilisation soufrée**

L'observation de déficiences en S et la nécessité de produire des fourrages de qualité pour les animaux indiquent qu'il faut considérer l'intérêt d'appliquer une fertilisation soufrée. Un apport systématique n'est cependant pas non plus conseillé. En effet, les situations de carences ne sont pas généralisées et restent même encore assez rares. Certaines formes d'engrais N et P contiennent parfois des quantités non négligeables de soufre. Un excès de soufre est préjudiciable à la qualité du fourrage notamment par antagonisme avec le sélénium (Singh et al., 1980) qui joue un rôle important en physiologie animale. Dans ces conditions, il est important de mettre au point des indicateurs de déficiences en cet élément afin de pouvoir évaluer l'intérêt de recommander une fertilisation soufrée.

Comme signalé plus haut, la teneur en sulfates, forme la plus assimilable par les plantes, est très labile dans le sol et il est très difficile de prédire la fourniture de S par le sol (Zhao et al., 2002). Les apports via les fertilisants azotés et phosphoriques peuvent varier fortement selon les types d'engrais utilisés localement. Les retombées atmosphériques peuvent varier fortement selon la proximité des zones industrielles et urbaines. Enfin, les besoins de la prairie sont également très variables en fonction du niveau de production qui dépend lui-même des conditions pédo-climatiques et du niveau d'intensification.

Pour ces raisons, pour évaluer le niveau de satisfaction des besoins en soufre de la prairie, il est généralement conseillé d'utiliser des indicateurs basés sur l'analyse du couvert végétal (Blake-kalff, 2002). Ce diagnostic consiste à comparer la teneur mesurée (ex : S total ou sulfate) dans une plante ou un organe avec une valeur cible qui correspond à une situation d'absence de déficience.

Cependant, comme pour le K et le P déjà mentionnés précédemment, les teneurs en S du végétal varient en fonction de l'accumulation de biomasse et dépendent également du niveau de nutrition azotée. On ne peut donc pas utiliser une valeur unique comme seuil de déficience.

Dans le cadre de recherches menées par l'Earth and Life Institute de l'Université catholique de Louvain, on a défini un indicateur de déficience en soufre basé sur la concentration en azote et en soufre total du couvert végétal prairial (Mathot et al., 2009) qui peut être appliqué à plus large échelle avec peu de restrictions d'utilisation .

## **2. Matériel et méthodes**

### **2.1. Données**

L'indicateur de déficience repose sur les teneurs en N et S du fourrage et sur les principes mentionnés par Duru et Théliér Huché (1997) pour le P et le K, soit que la teneur en S diminue durant la croissance du couvert et cette diminution est liée à la teneur en N. Les données utilisées pour le calcul de l'indicateur de déficience sont issues d'essais réalisés en champs ou en pots au Earth and Life Institute de l'Université catholique de Louvain par Mathot et al (2005 et 2008) et tirées de la littérature. Les données concernent toutes des essais de fertilisation soufrée sur des espèces prairiales. Seules les teneurs en N et S sont nécessaires et pas les rendements. Pour chacune de ces données, les valeurs de teneurs sont les moyennes des répétitions par traitement et par coupe. Les données provenant des essais en vases de végétation et en champs ont été utilisées sans distinctions. Un tri a été réalisé dans la base de données de façon à respecter trois critères proposés par Salette et Théliér (1991) pour la définition d'indicateurs similaires pour le P et le K. Ces critères permettent d'éviter les interférences liées à une proportion trop élevée de légumineuses et de restreindre le jeu de données à la zone où la diminution des concentrations avec la croissance du végétal (principe de dilution) est bien établie. Le premier critère est que la teneur en légumineuses doit être inférieure à 20% en

masse. Le second critère est que la teneur en azote doit être comprise entre 15 et 45 mg/g de matière sèche. Le troisième critère est que le rendement en matière sèche doit être compris entre 2 et 5 t de matière sèche par hectare. Le troisième critère n'a pas été pris en compte pour les essais en vase de végétation vu l'incohérence de rapporter les rendements obtenus à l'hectare. Après la sélection sur base de ces critères, les données ont été séparées en deux groupes. Les données du premier groupe correspondent à une situation de déficience pour laquelle les auteurs ont rapporté un effet positif d'une fertilisation soufrée soit sur le rendement soit sur la qualité de l'herbe (tableau 1). Les données du deuxième groupe correspondent à des échantillons dont la nutrition soufrée est suffisante sur base des observations rapportées par les auteurs (pas d'augmentation de rendement, ni de qualité lorsque du soufre est apporté).

Tableau 1 : Données sources.

Source	Expér.	Nombre de site	Espèce	Nombre de données	
				Déficient	Suffisant
Bolton et al., 1976	Pot	/	Lp	7	38
Brown et al., 2000	Champs	2	Lp	2	9
Eppendorfer, 1976	Pot	/	Lm	7	80
Hahtonen and Saarela, 1995	Champs	6 <sup>(a)</sup>	Pp, Dg et Fp	0	80
Kowalenko, 2004	Champs	1 <sup>(b)</sup>	Dg, Lp, Fa, Tp et Tr	3	15
Mathot et al., 2005	Pot	/	Lp	12	79
Mathot et al., 2008	Champs	8	Lp et Lm	14	366
Mertens, 2005	Champs	2	Lp	2	49
Morris et al., 1994	Champs	1	Lm	0	54
Murphy et al., 2002	Champs	1 <sup>(b)</sup>	Lp et Tr	2	4
Stevens and Watson, 1986	Champs	20 <sup>(c)</sup>	n.c.	10	42
Total				59	816

<sup>(a)</sup> Chaque site est un couvert pur de Pp, Dg or Fp. <sup>(b)</sup> Moins de 20 % de Tp or Tr, <sup>(c)</sup> décrit comme des herbes pour ensilage.

Lp= *Lolium pratense* ; Lm=*Lolium multiflorum* ; Pp=*Phleum pratense* ; Dg=*Dactylis glomerata* ; Fp=*Festuca pratensis* ; Fa=*Festuca arundinacea* ; Tp=*Trifolium pratense* ; Tr=*Trifolium repens*.

## 2.2. Méthode de définition de l'indicateur

Comme on peut le constater sur un graphique reprenant les teneurs N et S des fourrages (figure 1), on peut intuitivement distinguer 3 zones. Une zone (1) dans laquelle il n'y a que des échantillons « suffisants » en S, une zone (2) où il y recouvrement d'échantillons « suffisants » et « déficients » et finalement une zone (3) où il y a principalement des échantillons « déficients ». A l'aide de la méthode Bolides (Schnug et al., 1996) et de la méthode de l'analyse discriminante (Systat, 1998), on a défini précisément les relations linéaires entre les teneurs en N et S des fourrages qui délimitent ces zones. Cette démarche est décrite en détail par Mathot et al. (2009). Pour les points « suffisants », elle consiste à l'aide de la méthode Bolides à définir la droite qui délimite les teneurs en S les plus faibles de ce nuage de données (figure 2). Tout échantillon situé en-dessous de cette droite sera considéré comme déficient. Pour les points « déficients », on définit avec la même méthode Bolides, la droite qui délimite les teneurs les plus élevées en S (figure 3). Tout échantillon situé au-dessus de cette droite est considéré comme « suffisant ». Dans la zone comprise entre ces deux droites se situent des échantillons « déficients » et « suffisants ». Au sein de cette zone, la discrimination entre les deux jeux de données est réalisée à l'aide de l'analyse discriminante. La droite définie par cette méthode permet de classer au sein de cette zone (zone 2) les données en fonction de leur niveau de nutrition soufrée.

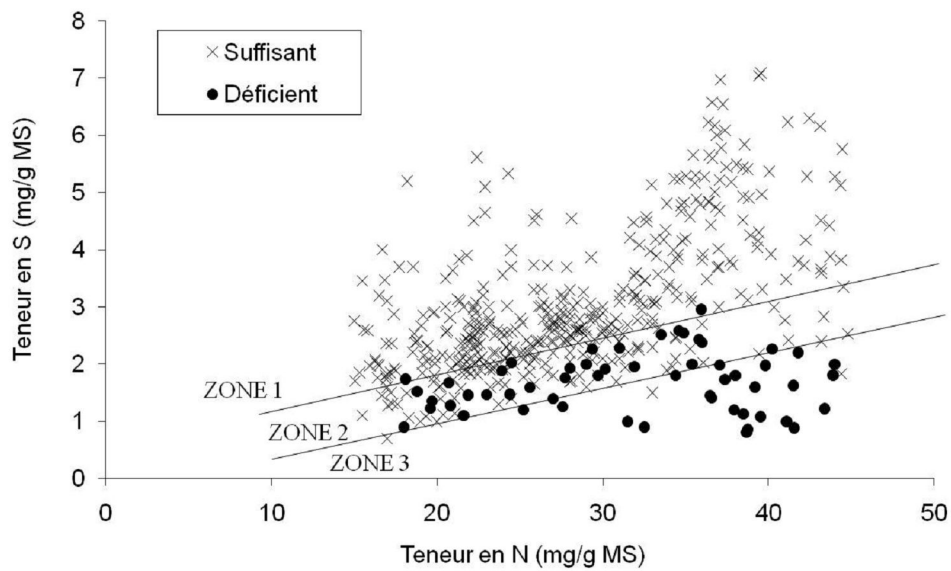


Figure 1 : Répartition des données et aperçu intuitif des zones de niveau de nutrition soufrée, zone 1 = suffisant, zone 2 = incertitude, zone 3 = déficient

### 3. Résultats

L'application de la méthode Bolides permet de définir des droites de régression permettant de délimiter deux zones dans lesquelles le risque d'erreur de niveau de nutrition soufrée est faible. Ces zones sont nommées zones de suffisance (figure 2) et de déficience (figure 3). Entre ces deux zones se situe une zone dans laquelle on retrouve aussi bien des données provenant d'échantillons à niveau de nutrition soufrée déficient et suffisant et dont la répartition ne permet pas de distinction aisée entre les deux niveaux (figure 4). La méthode de l'analyse discriminante permet de réaliser cette distinction et de définir une droite appelée **Su** délimitant deux zones. Au-dessus de cette droite, vers les teneurs en S plus élevées il y a une zone dans laquelle on estime que l'échantillon correspond à un fourrage dont le niveau de nutrition soufré est « probablement » suffisant. En-dessous de la droite, vers les teneurs en S les plus faibles on estime que l'échantillon correspond à un fourrage « probablement » déficient en S. Le qualificatif probablement est utilisé car dans ces zones, il y a un recouvrement important entre échantillons déficients et suffisants.

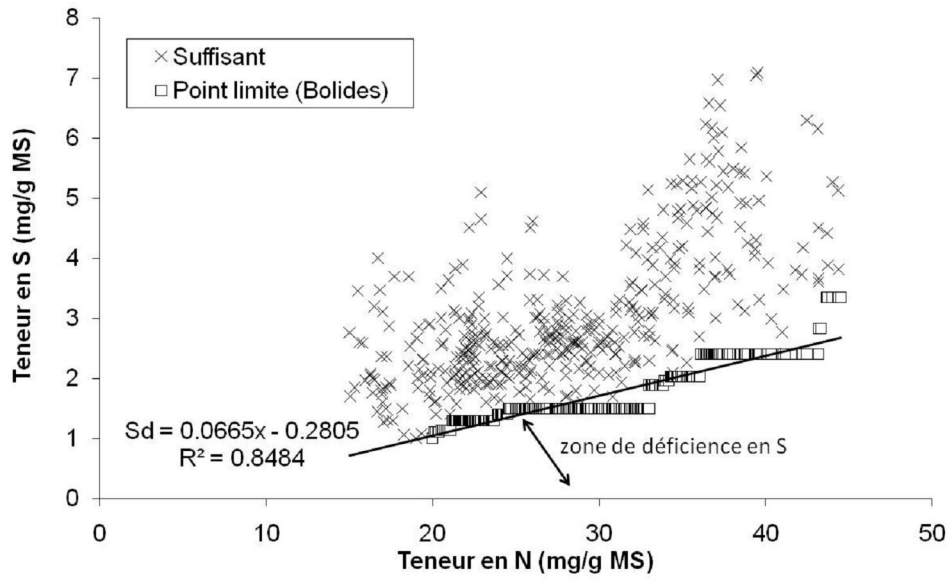


Figure 2 : Teneurs en N et S des échantillons suffisants en S, points limites déterminés à l'aide de la méthode Bolides et droite (Sd) passant par les points limites.

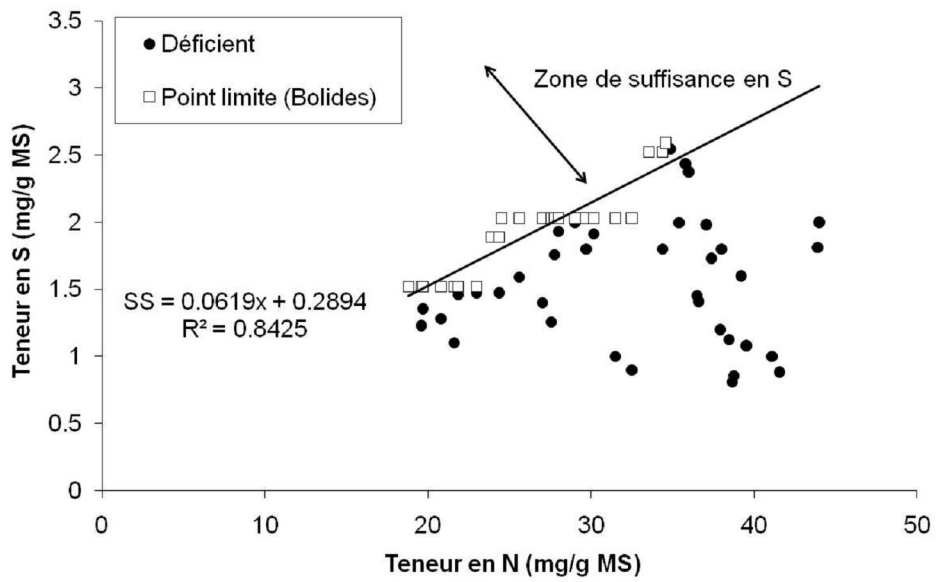


Figure 3 : Teneurs en N et S des échantillons « déficients » en S, points limites déterminés par la méthode Bolides et droite (Ss) passant par les points limites.

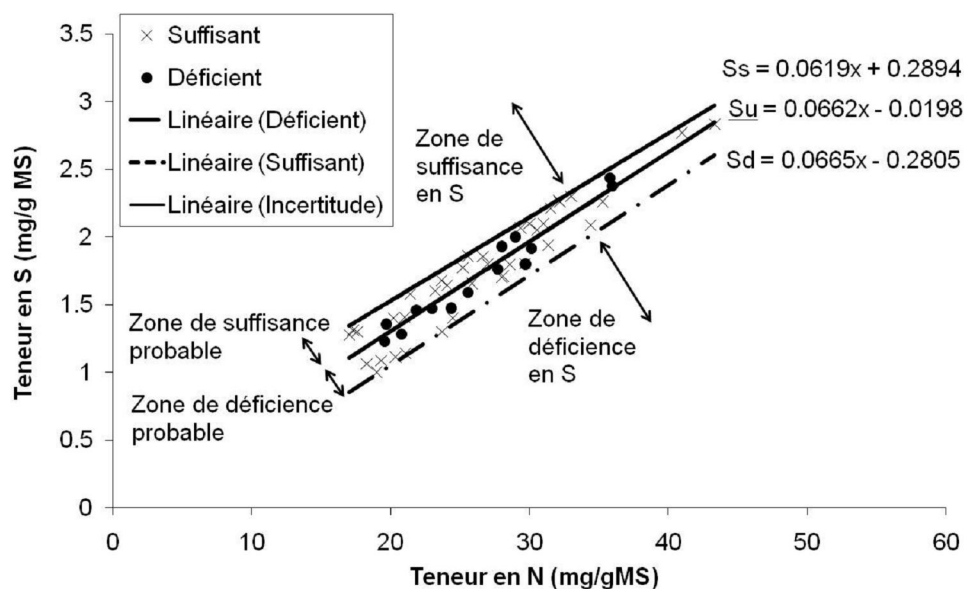


Figure 4 : Teneurs en N et S des échantillons « suffisants » et « déficients » situés dans la zone d'incertitude et droite (Su) définie par la méthode de l'analyse discriminante appliquées sur ces échantillons.

Dans ces zones, on constate (figure 5), pour les échantillons déficients en S, que plus la teneur en S mesurée est éloignée de la valeur critique définie par la droite Su  $((\text{Teneur en S} - \text{Su})/\text{Su}) \times 100, \%$  plus le déficit de rendement observé par rapport au témoin fertilisé est important (%). Par combinaison de la relation établie et de la droite Su, on peut définir des zones de pertes potentielles en rendements pour une teneur en S et en N donnée (figure 6)

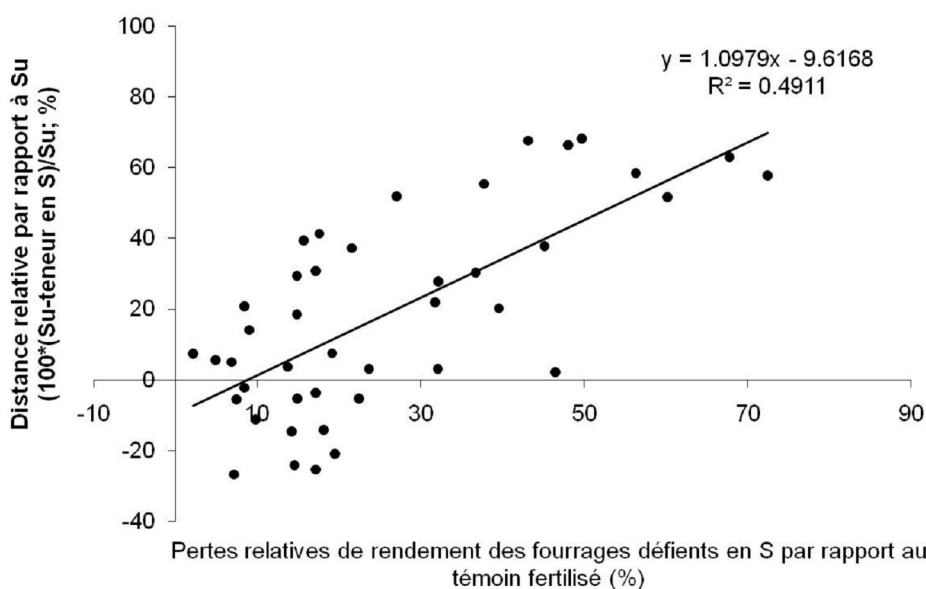


Figure 5 : Relation entre la distance relative (%) de la teneur en S par rapport à la valeur critique définie par l'équation Su des échantillons déficients et la perte de rendement par rapport au témoin fertilisé (%)

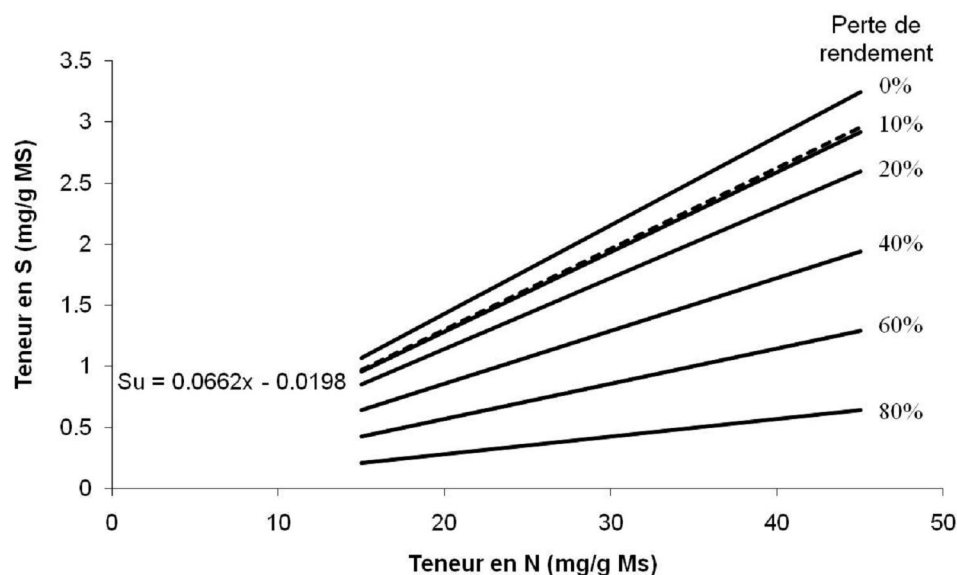


Figure 6 : Pertes potentielles de rendements en fonction de l'éloignement des teneurs en N et en S par rapport aux valeurs critiques définies par la droite Su

On constate alors que la droite Su (figure 6) correspond à une perte potentielle de rendement qui est estimée à 10%, ce qui correspond généralement au seuil en-dessous duquel il est difficile de mettre en évidence des différences significatives de rendements pour des essais de terrain en prairies.

#### 4. Discussion

L'outil développé permet de définir le niveau de nutrition soufrée à partir de l'analyse des teneurs en N et S de l'herbe. Ce niveau peut être considéré comme certainement déficient, probablement déficient, probablement suffisant ou certainement suffisant. Mais, il faut garder à l'esprit qu'il y a tout de même quelques contraintes à son utilisation. Celles-ci ont été évoquées précédemment :

- proportion de légumineuses inférieure à 20% en masse du fourrage
- teneurs en N comprises entre 15 et 45 mg de N/g MS
- rendements compris entre 2 et 5 tonnes de MS/ha

La méthode a également été validée pour des échantillons conservés par ensilage à l'aide d'une simple correction (Mathot et al., 2009).

#### 5. Conclusion

La diminution des retombées atmosphériques et l'utilisation de fertilisants pauvres en S ont pour conséquence l'apparition de déficiences en soufre. Il y a donc un intérêt croissant pour élaborer des outils permettant de caractériser le niveau de nutrition soufrée. Un diagnostic reposant sur trois équations permet de caractériser le niveau des prairies en cet élément uniquement à partir des teneurs en soufre et en azote des fourrages. Il y a peu de restriction à l'emploi de cette méthode qui pourrait être utilisée à large échelle étant donné le nombre limité d'informations nécessaires.

## 6. Références bibliographiques

- Black Kalff, M., Zhao, F.J., McGrath, P., 2002. Sulphur deficiency diagnosis using plant tissue analysis. In: Proceedings N° 503, International Fertiliser Society, York.
- Bolton, J., Nowakowski, T.Z., Lazarus, W., 1976. Sulphur-nitrogen interaction effects 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, 533–560.
- 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. *Journal of Agricultural Science* 135, 131–138.
- Bussink, D.W., Den Boer, D.J., 2000. Sulphur fertilization on grassland in relation to crop yield and nitrogen use efficiency. *Meststoffen* 2000, 68–70.
- Ceccotti, S.P., 1996. Plant nutrient sulphur—a review of nutrient balance, environmental impact and fertilizers. *Fertilizer Research* 43, 117–125.
- Duru, M., Thélier Huché, L., 1997. N and P-K status of herbages: use for diagnosis of grasslands. Diagnostic procedures for crop N management. In: Inra (Ed.), *Les colloques de l'Inra*, 125–138.
- EMEP, 2011. <http://www.emep.int/>
- Eppendorfer, W.H., 1976. Effects of varying amounts of sulphur and nitrogen on yield, N/S ratio and amino-acid composition of successive cuts of Italian ryegrass. *Royal veterinary and agricultural university yearbook*, 42–57.
- Hahtonen, M., Saarela, I., 1995. The effects of sulphur application on yield, sulphur content and N/S-ratio of grasses for silage at six sites in Finland. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B Soil and Plants Sciences* 45, 104–111.
- Helgadóttir, A., Palmason, F., Björnsson, H., 1977. The effect of sulphur fertilization on hay yield and its influence on sulphur content in grass. *Journal of Agricultural Research in Iceland* 9, 3–21 (in Icelandic).
- Kowalenko, C.G., 2004. Variations in within season nitrogen and sulfur interaction effects on forage grass. Response to combinations of nitrogen, sulfur and boron applications. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35 (5 and 6), 759–780.
- Lemaire, G., Salette, J., 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. *Agronomie* 4 (5), 423–440 (in French).
- Mathot, M., Lambert, R., Toussaint, B., Peeters, A., 2005. Total sulphur content and N:S ratio as indicators for S deficiency in grasses., In: Jarvis, S.C., Murray, P.J., Roker, J.A. (Eds.), *Optimisation of nutrient cycling and soil quality for sustainable grasslands. Proceeding of the XXth International Grassland Congress*, p. 90.
- 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.
- McGrath, S.P., Zhao, F.J., Blake Kalff, M., 2002. History and outlook for sulphur fertilizers in Europe. In: Proceedings N° 497, International Fertiliser Society, York.
- Mathot M., Lambert R., Mertens J., Agneesens R., Toussaint B. and 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 COST 829 meeting. Progress in sulfur research 1997-2003*. Braunschweig, Germany, 29.



Mathot M., Thélïer-Huché L. and Lambert R. Sulphur and nitrogen content as sulphur deficiency indicator for grasses Europ. J. Agronomy 30 (2009) 172–176

Mathot M. and Lambert R. Evaluation of P, K and S grassland nutrition thanks to nitrogen and mineral concentrations of silage. 2009. in : Proceedings of the 16th Nitrogen Workshop, Turin, Italy, July 2009. pp. 339-340.

Mertens, J., 2005. Studie van de zwaveldynamieke in de bodem en de zwavelbeschikbaarheid voor plantgroei. Eindrapport vane de orderzoek S-6202. IWT-Vlaanderen. Bodemkundige dienst van Nelgïe, Leuven (in Netherlands).

Metson, A.J., Saunder, W.M.H., 1978. Seasonal variations in chemical composition of pasture. II Nitrogen, sulphur and soluble carbohydrate. New Zealand Journal of Agricultural Research 21, 355–364.

Morris, D.R., Brown, T.F., Baligar, V.C., Corkern, D.L., Zeringue, K.L., Mason, L.F., 1994. Ryegrass forage yield and quality response to sulfur and nitrogen fertilizer on coastal plain soil. Communication of Soil Science Plants Analysis 25 (17 and 18), 3035–3046.

Murphy, M.D., Coulter, B.S., Noonan, D.G., Connolly, J., 2002. The effect of sulphur fertilization on grass growth and animal performance. Irish Journal of Agricultural and Food Research 41, 1–15.

NRC (Ed.), 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle, seventh revised ed. National Academy Press, Washington, DC

Salette, J.E., 1978. Sulphur content in grasses during primary growth. In: An Foras Taluntais (Ed.), Sulphur in Forages, Proceedings of Symposium, pp. 142–152.

Salette, J., 1982. The role of fertilizers in improving herbage quality and optimization of its utilization. In: Proceedings of the 12th international Potash Institute Congress, pp. 117–144.

Salette, J.E., Thélïer, L., 1991. Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse du vegetal: principes, mise en oeuvre, exemples. Fourrages 125, 3–18 (in French).

Schnug, E., Heym, J., Achwan, F., 1996. Establishing critical values for soil and plant analysis by mean of boundary line development system (Bolides). Communication of Soil Science and Plants Analysis 27 (13 and 14), 2739–2748.

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.

Stevens, R.J., Watson, C.J., 1986. The response of grass for silage to sulphur application at 20 sites in Northern Ireland. The Journal of Agricultural Science 107, 55–571.

Systat, 1998. Systat 8.0 Statistics. SPSS Science Marketing Department. SPSS Inc., Chicago.

Verlinden, G., 2002. Sulphur dynamic in Belgian agricultural soils. Dissertations de Agricultura, University of Leuven.

Zhao, F.J., McGrath, S.P., Blake Kalff, M., Link, A., Tucker, M., 2002. Crop responses to sulphur fertilisation in Europe. In: Proceedings N° 504, International Fertiliser Society, York.