

Effets d'un nouvel engrais phosphaté sur la nutrition et le rendement du blé

Aurélien Roger^{1,2}, Sylvain Pluchon², Jean-Claude Yvin², Mohammed Benbrahim³, Laurent Kremer³ et Sokrat Sinaj¹

¹Agroscope, Institut des sciences en production végétale IPV, 1260 Nyon, Suisse

²Groupe ROUILLER – Centre Mondial d'Innovation, 35800 Dinard, France

³RITMO Agroenvironnement, ZA Biopôle, 68000 Colmar, France

Renseignements: Sokrat Sinaj, e-mail: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch



Blé de printemps en pleine floraison lors de l'expérience menée dans la serre de Changins.

Introduction

Le phosphore (P) est un élément indispensable à la nutrition des plantes. Il joue un rôle important dans de nombreux processus de développement des plantes, comme la photosynthèse, le développement racinaire, le stockage d'énergie (Marschner 1995). En agriculture, la fertilisation phosphatée doit faire face à des contraintes économiques et écologiques. D'une part, les stocks de P facilement extractible se réduisent considérablement et tendent à faire augmenter le prix des engrais phosphatés (Gilbert 2009). D'autre part, une dose d'engrais phosphaté supérieure aux besoins des cultures agricoles augmente les risques de pollution et d'eutrophisation des eaux souterraines à cause des phénomènes d'érosion

et de lessivage (Gillingham et Thorrold 2000; Sharpley et al. 2000; Braun et al. 2001).

Les plantes prélèvent leur P sous forme d'ions orthophosphates (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) dans la solution du sol. En fonction du type de sol et de la solubilité de l'engrais apporté, le P issu d'un engrais peut se retrouver soit dans la plante, soit dans le sol, sous forme assimilable dans la solution du sol ou fixé dans la phase solide. Le super simple phosphate (SSP), un des engrais phosphatés les plus couramment utilisés en Suisse, libère rapidement une grande partie du P dans la solution du sol. En fonction du type de sol, cet élément est plus ou moins vite incorporé dans la phase solide du sol. L'engrais phosphaté Timac (SSP-TIM) est un engrais granulé mêlant intimement un agent complexant du phosphate naturel et une molécule biostimulante assurant une protection du P, de façon à limiter la fixation après apport et permettre une mise à disposition progressive pour la plante. Cette étude évalue l'efficacité pour la nutrition phosphatée du blé du produit SSP-TIM par rapport à un engrais phosphaté traditionnel (SSP).

Matériel et méthodes

Prélèvement et préparation de la terre

Les sols ont été prélevés dans l'horizon 0–20 cm de deux parcelles: la parcelle 10 du domaine expérimental d'Agroscope à Changins et une parcelle agricole située à environ 40 km au sud-ouest de Colmar. Une fois prélevée, la terre a été séchée à 40 °C pendant 48 h, puis tamisée à 2 mm. Le sol de Colmar est de pH acide et de texture sableuse, tandis que celui de Changins est de pH neutre et de texture argileuse avec une forte capacité de fixation du P (Sinaj et al. 2014).

Fertilisation N, K, S et Mg

La fertilisation minérale a été calculée d'après les Données de base pour la fumure des grandes cultures et

herbage DBF (Sinaj *et al.* 2009). Selon les DBF, l'apport doit être de 120 kg ha⁻¹ d'N, 70 kg ha⁻¹ de K₂O et 10 kg ha⁻¹ de Mg pour le blé de printemps. Les apports de N, K, S et Mg sont identiques pour les deux essais.

Selon Levy Häner *et al.* (2012), la densité idéale de semis pour le blé de printemps est de 450 grains viables/m². A partir de ces données, la dose nécessaire à apporter pour chaque engrais a été calculée pour un pot de 12 cm de diamètre (surface de 121 cm², contenant 1 kg de terre sèche et 5 grains par pot) dans l'essai Changins et pour un pot de 18 cm de diamètre (surface 255 cm², contenant 4,7 kg de terre sèche et 20 grains par pot) pour l'essai Colmar.

Fertilisation P et mise en place des traitements

Selon Sinaj *et al.* (2009), l'optimum de fertilisation P pour le blé de printemps est de 50 kg de P₂O₅ par hectare. Deux engrais P ont été utilisés: le super simple phosphate (SSP), contenant 18% de P₂O₅, 4% de Mg et 6% de S, et l'engrais issu des laboratoires TIMAC-AGRO (SSP-TIM) contenant 18% de P₂O₅ complexé, 0,1% de Mg, 13% de S et une molécule biostimulante. Pour chacun des engrais P, deux doses ont été testées (0,5 x norme, soit 25 kg P₂O₅/ha, et 1 x norme, soit 50 kg P₂O₅/ha). Ces 4 procédés ont été accompagnés d'un traitement témoin qui n'a reçu aucun engrais phosphaté (procédé contrôle). Dans l'essai Changins, chaque procédé comprenait 12 pots. Dans l'essai Colmar, chaque procédé comptait 8 pots.

Conditions climatiques et agencement des pots en serre

Dans la serre, la température a été maintenue entre 10 et 25 °C et le taux d'humidité de l'air entre 50 et 70%. La variation de la température et du taux d'humidité entre ces bornes s'est faite en fonction des conditions extérieures. La photopériode a également suivi les conditions climatiques locales. Au cours de l'expérience, les pots ont été arrosés tous les jours avec de l'eau déminéralisée afin de conserver une capacité au champ de l'ordre de 70%. Chaque semaine, une rotation des blocs dans la serre a été effectuée afin de limiter les biais liés à l'hétérogénéité des conditions dans la serre.

Mesures et analyses

Dans l'essai Changins, des mesures et des analyses ont été menées à trois périodes différentes au cours de l'expérimentation: (P1) Formation de l'épi (stade BBCH 45, atteint 50 jours après semis), (P2) Floraison complète (stade BBCH 69, atteint 64 jours après semis) et (P3) Maturité pour la récolte (stade BBCH 89, atteint 101 jours après semis). A chaque fois, quatre pots ont été prélevés

Résumé ■ Le phosphore (P) est un élément minéral essentiel à la croissance des plantes. Etant donné que le stock mondial de P facilement extractible est en baisse et qu'une sur-fertilisation de cet élément peut être source de pollution, il apparaît nécessaire d'améliorer l'efficacité des engrais phosphatés en agriculture. Deux expériences indépendantes ont été menées à Agroscope Changins (Suisse) et à RITTMO-Colmar (France) pour comparer l'efficacité d'un engrais combinant un phosphate complexé avec une substance biostimulante (SSP-TIM) à celle d'un engrais phosphaté couramment utilisé: le super simple phosphate (SSP). Chaque expérience a été conduite en serre en conditions contrôlées. L'expérience réalisée à Colmar a été menée sur un sol acide et sableux, celle conduite à Changins sur un sol neutre, argileux avec une forte capacité de fixation du P. Dans les deux cas, cinq procédés ont été comparés: un contrôle (aucun apport de P) et deux doses différentes pour chacun des deux engrais (SSP et SSP-TIM) équivalentes à 25 et à 50 kg de P₂O₅ par hectare. Sur sol acide, l'engrais SSP-TIM à la dose de 25 kg P₂O₅/ha a permis une augmentation significative de 19% du rendement total du blé par rapport à l'engrais SSP. Sur sol argileux, l'engrais SSP-TIM a également entraîné une augmentation positive mais non significative de 5% du rendement du blé. Les résultats varient selon le stade de développement de la plante et la dose d'engrais appliquée, entre autres facteurs. Cette étude montre que l'engrais SSP-TIM peut être valorisé dans les deux types de sol, surtout lorsque la dose de l'engrais est réduite, ce qui correspond à de nombreuses situations agricoles en Suisse.

par procédé. La productivité des cultures a été mesurée en termes de matière sèche aérienne produite (séchage à 50 °C pendant 48 h) et de quantité de grains par plante.

Dans l'essai Colmar, un premier prélèvement de 4 pots a été réalisé pour l'analyse de la morphologie racinaire et un second prélèvement de 4 pots a été réalisé à maturité pour déterminer le rendement en blé et les exportations de P. La morphologie du système racinaire a été analysée au stade BBCH45. Les racines de deux plantes par pot ont été soigneusement dégagées puis rincées à

l'eau du robinet. Le système racinaire a été numérisé à l'aide d'un scanner à double source de lumière associé au système WinRHIZO®. Le système WinRhizo® est un logiciel d'analyse d'images (*Regent Instr. Inc*) qui permet de déterminer les données morphologiques racinaires: longueur et surface totales des racines (Arsenault *et al.* 1995).

Dans les deux essais, l'efficacité relative agronomique (ERA) des engrais a été mesurée, lors des trois stades de prélèvement pour l'essai Changins et uniquement à la récolte pour l'essai Colmar, selon la formule suivante:

$$ERA = (P_{\text{exporté SSP-TIM}} - P_{\text{exporté Contrôle}}) /$$

$$(P_{\text{exporté SSP}} - P_{\text{exporté Contrôle}}) * 100. \text{ Où}$$

$P_{\text{exporté Contrôle}}$: quantité de phosphore exportée dans les plantes dans le procédé contrôle

$P_{\text{exporté SSP}}$: quantité de phosphore exportée dans les plantes dans le procédé SSP

$P_{\text{exporté SSP-TIM}}$: quantité de phosphore exportée dans les plantes dans le procédé SSP-TIM

Analyses statistiques

Des analyses de variance (ANOVA) ont été conduites pour tester l'effet global des procédés sur les variables étudiées (paramètres de morphologie des racines, quantités de P exportées par le blé et biomasses produites). Par la suite, des tests de comparaison deux à deux (test de Student) ont été effectués pour identifier les différences significatives entre l'engrais SSP-TIM et son correspondant SSP à dose égale. Ces tests ont été appliqués sans correction et indépendamment du fait que la distribution des données suivait une loi normale ou pas. L'efficacité agronomique relative des engrais a ensuite été calculée selon Frossard *et al.* (2004). L'ensemble des analyses statistiques a été conduit avec le logiciel R 3.0.1 (R core team 2013).

Résultats et discussion

Morphologie des racines de blé

L'analyse de la morphologie racinaire dans l'essai Colmar n'a pas montré d'effet significatif sur la longueur totale des racines ou leur surface, ni sur le nombre total de pointes de racines présentes. Néanmoins, une augmentation de ces paramètres a été observée avec l'engrais SSP-TIM par rapport au procédé sans engrais phosphaté. A l'inverse, les blés qui ont reçu le traitement SSP montrent une légère diminution de ces paramètres par rapport au procédé contrôle et une diminution plus importante, mais toujours non significative, par rapport au procédé SSP-TIM. Parmi les paramètres étudiés, la longueur totale des racines ayant un diamètre com-

pris entre 1 et 1,5 mm révèle une différence significative entre les deux formes d'engrais phosphatés (tabl. 1).

Acquisition du P par le blé

Pour l'essai Changins, la figure 1 montre les quantités totales de P exportées par les plantes au cours du temps dans les cinq procédés. Lorsque la moitié de la norme d'engrais P a été apportée (25 kg P₂O₅ par/ha), les quantités de P exportées par les plantes au moment du premier prélèvement (gonflement de la tige, 50 jours après le semis) étaient les mêmes pour les deux formes d'engrais et ne se distinguaient pas du procédé contrôle. En revanche, lors du deuxième prélèvement (floraison complète, 64 jours après le semis), les plantes des procédés SPP-TIM ont exporté significativement plus de P que celles fertilisées avec l'engrais SSP ou qui n'avaient pas reçu de P. Lors de la récolte finale (101 jours après le semis), les quantités moyennes de P exportées par les plantes fertilisées (procédés SPP-TIM et SPP) n'étaient pas différentes entre elles, mais supérieures à celle exportée par les plantes du procédé contrôle. Ainsi, lorsque la moitié de la norme a été apportée, la forme de l'engrais n'a pas modifié la quantité totale de P exportée par les plantes, mais elle a modifié la dynamique de prélèvement: l'engrais SSP-TIM a permis une acquisition du P plus précoce. A la récolte, la quantité moyenne de P exportée par les plantes du procédé SSP 25 kg/ha est étonnamment élevée. Cela s'explique par le fait que 2 des 4 plantes récoltées avaient, de manière inexplicable, une concentration en P très élevée.

Lorsque les engrais ont été appliqués à des doses correspondant à la norme de fumure (50 kg P₂O₅/ha), nous avons aussi observé un prélèvement plus précoce du P par les plantes avec l'engrais SPP-TIM, mais également une différence significative entre les deux engrais en ce qui concerne la quantité totale de P prélevée par les plantes à la récolte (SSP-TIM > SSP, $p = 0,028$).

Tableau 1 | Effet de la forme de l'engrais phosphaté (dose 50 kg P₂O₅/ha) sur la morphologie du système racinaire du blé au stade BBCH 47 (le procédé contrôle sert de référence)

Caractéristiques des racines	SSP	SSP-TIM	ANOVA
	%		
Longueur totale des racines (mm)	-19	0	ns
Longueur des racines de diamètre 1 à 1,5 mm	-31	27	$p < 0,05$
Volume racinaire total (mm ³)	-3	55	ns
Nombre total de pointes de racines	-6	10	ns

Tableau 2 | Efficacité relative agronomique (ERA) des engrais SSP et SSP-TIM en culture de blé: suivi dynamique des prélèvements sur sol de pH neutre (essai Changins)

Dose	Engrais	Gonflement de la tige (50 jours après semis)	Floraison (64 jours après semis)	Récolte (101 jours après semis)
25 kg P ₂ O ₅ /ha	SSP-TIM	3,15%	14,13%	19,40%
	SSP	4,62%	7,87%	18,62%
50 kg P ₂ O ₅ /ha	SSP-TIM	2,16%	12,45%	15,26%
	SSP	4,82%	7,01%	11,45%

Tableau 3 | Efficacité relative agronomique (ERA) des engrais SSP et SSP-TIM en culture de blé sur sol de pH acide (essai Colmar)

Dose	25 kg P ₂ O ₅ /ha			50 kg P ₂ O ₅ /ha		
	SSP	SSP-TIM	Anova	SSP	SSP-TIM	Anova
ERA	6,90%	7,30%	ns	5,03%	5,73%	ns

L'efficacité relative agronomique (ERA) des engrais, correspondant à l'estimation de la proportion de P contenu dans les engrais qui est absorbé par les plantes, est indiquée dans le tableau 2 pour l'essai Changins. Le principal enseignement que l'on peut tirer des résultats obtenus est que l'ERA à la récolte est légèrement supérieure avec l'engrais SSP-TIM et largement supérieure au moment de la floraison (quasiment le double dans le cas d'un apport de P équivalent à la moitié de la norme de fumure), ce qui confirme les résultats observés dans la dynamique d'absorption (fig. 1).

Dans l'essai de Colmar, l'ERA a été déterminé uniquement à la récolte (tabl. 3). Les résultats montrent qu'en fin d'essai, les ERA des deux engrais ne sont pas significativement différentes.

Rendement du blé

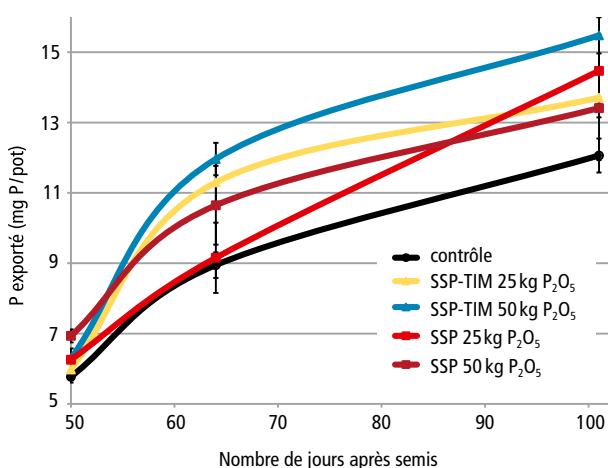
Sur sol acide (essai Colmar), l'apport d'engrais P augmente significativement la biomasse de la paille et des épis au stade BBCH45 (fig. 2). Pour la paille, aucune différence significative n'a été observée entre les engrais SSP et SSP-TIM. Par contre, pour les deux doses, la biomasse des épis des procédés SSP-TIM est significativement supérieure à celle des procédés SSP.

Dans l'essai de Changins en sol neutre, à la récolte, les résultats montrent une augmentation significative des rendements en grain et en paille dans les procédés fertilisés par rapport au procédé contrôle (fig. 3). A la

dose de 25 kg P₂O₅/ha, on observe une tendance à l'augmentation des rendements de 10% pour la paille et de 18% pour les grains avec l'engrais SSP-TIM par rapport à l'engrais SSP. A la dose de 50 kg P₂O₅/ha, le rendement en paille a tendance à être plus élevé avec l'engrais SSP qu'avec l'engrais SSP-TIM.

Le fait que les expériences se soient déroulées sous serres a permis d'effectuer des mesures beaucoup plus fines et précises en ce qui concerne l'acquisition du P par la plante. Néanmoins, l'expérimentation en serres a restreint la quantité de sol disponible pour chaque plante par rapport aux conditions naturelles, ce qui a conduit à une surexploitation du sol par le système racinaire et un plafonnement de la production de biomasse (spécialement dans l'expérience conduite à Changins avec des pots de culture plus petits). Le test en serres de l'effet des engrais sur les rendements en blé ne donne que des résultats indicatifs et une expérimentation au champ sera indispensable pour obtenir des résultats plus fiables.

Cette étude a permis de relever certains avantages de l'engrais phosphaté SSP-TIM par rapport à son homologue de référence. Cependant, ces avantages n'étaient souvent significatifs que lors des prélèvements intermédiaires et n'apparaissent pas au moment de la récolte finale. Ce résultat a été observé aussi bien dans l'essai de Changins, sur un sol neutre, que dans l'essai de Colmar, sur un sol acide. Les résultats de cette étude sont assez clairs en ce qui concerne les quantités de P exportées par les plantes, mais ils ne permettent pas de tirer des conclusions en faveur de l'un ou de l'autre engrais concernant les rendements. Plus spécifiquement, il semblerait que les différences entre l'engrais SSP-TIM et l'engrais de référence soient plus visibles lors d'application d'engrais à

**Figure 1 |** Dynamique d'absorption du P par le blé en fonction des doses et des formes d'engrais apportées (essai Changins, moyennes avec erreur standard).

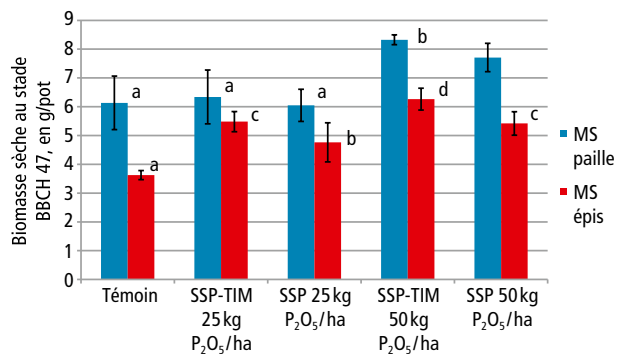


Figure 2 | Effets des différents procédés sur la biomasse du blé au stade BBCH45 cultivé sur sol acide (essai Colmar, moyennes avec erreur standard).

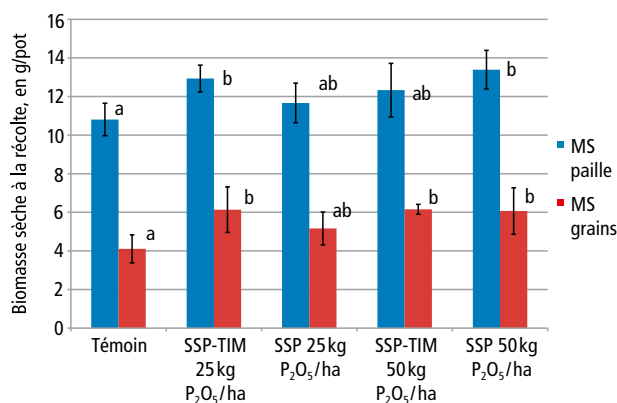


Figure 3 | Effets des différents procédés sur la biomasse du blé à la récolte, cultivé sur sol neutre (essai Changins, moyennes avec erreur standard).

demi-dose; cela laisse supposer que le processus de protection et de diffusion lente du P de l'engrais SSP-TIM lui permet d'atteindre une meilleure efficacité, même à dose réduite. Ce résultat est intéressant dans le contexte de l'agriculture suisse où de nombreuses parcelles agricoles sont bien pourvues en P et pour lesquelles la dose d'engrais phosphaté recommandée est souvent inférieure à la norme (Roger *et al.* 2013). Ce résultat est éga-

lement conforté par les analyses morphologiques des racines réalisées sur le sol acide. En effet, les longueurs et les surfaces totales des racines ne sont pas significativement différentes entre les deux engrais, même si l'on observe une tendance à l'augmentation du développement du système racinaire dans les traitements SSP-TIM (tabl. 1). Ceci indique que les différences de prélèvement du P sont dues principalement à la forme de l'engrais et non pas à un système racinaire davantage ramifié, ce qui peut être un facteur important dans le processus d'acquisition du P par les céréales (Gahoonia *et al.* 2009). Il est probable que la technologie mise en œuvre dans l'engrais SSP-TIM a permis une meilleure biodisponibilité du P. Il serait intéressant de comparer ces engrais pour une large gamme d'apports de P, afin de pouvoir déterminer l'équivalence engrais entre le SSP-TIM et le SSP de référence. Ceci permettrait ensuite de déterminer l'économie en P réalisée par l'engrais SSP-TIM par rapport à l'engrais de référence SSP – tout en assurant le même rendement des cultures.

Dans le contexte mondial actuel concernant la protection des ressources non renouvelables comme le P, les technologies permettant une meilleure efficacité des engrais et donc une réduction des doses appliquées doivent être étudiées en priorité.

Conclusions

Cette expérience démontre que la protection du P dans l'engrais SSP-TIM améliore l'utilisation du P par la culture de blé de printemps en assurant une assimilation plus précoce. En revanche, cette expérience ne permet pas d'affirmer que l'engrais SSP-TIM a des effets bénéfiques sur le rendement du blé. Etant donné la problématique mondiale autour du P, la politique agricole suisse prônant une agriculture plus écologique et l'état du P dans les sols suisses, la technologie utilisée dans l'engrais SSP-TIM pourrait représenter une alternative intéressante aux engrais P traditionnels. ■

Riassunto

Effetti di un nuovo concime fosfatico sull'alimentazione e sulla resa del grano

Il fosforo (P) è un elemento minerale essenziale per la crescita delle piante. Poiché la riserva mondiale di fosforo facilmente estraibile è in diminuzione e una fertilizzazione eccessiva di questo elemento può costituire una fonte di inquinamento, occorre migliorare l'efficacia dei concimi fosfatici nell'agricoltura. Due esperimenti indipendenti sono stati condotti presso la sede di Agroscope a Changins (Svizzera) e a RITTMO-Colmar (Francia) per confrontare l'efficacia di un concime che combina un fosfato complesso con una sostanza ad azione biostimolante (SSP-TIM) con quella di un concime fosfatico normalmente utilizzato: il superfosfato semplice (SSP). Ciascun esperimento si è svolto in serra in condizioni controllate. L'esperimento realizzato a Colmar è stato condotto su un suolo acido e sabbioso, quello a Changins su un suolo neutro, argilloso con una forte capacità di fissazione del fosforo. In entrambi i casi sono stati comparati cinque procedimenti: un controllo (senza apporto di P) e due dosi differenti per ognuno dei due concimi (SSP e SSP-TIM) equivalenti a 25 e a 50 kg di P_2O_5 per ettaro. Sul suolo acido, il concime SSP-TIM con la dose di 25 kg P_2O_5 per ettaro ha consentito un aumento significativo del 19 per cento del rendimento totale del grano rispetto al concime SSP. Sul suolo argilloso, anche il concime SSP-TIM ha comportato un aumento positivo, ma non significativo, del 5 per cento del rendimento del grano. I risultati variano a seconda di vari fattori tra cui lo stadio di sviluppo della pianta e la dose di concime applicata. Questo studio mostra che il concime SSP-TIM può essere valorizzato sui due tipi di terreni, soprattutto quando la dose del concime è ridotta, il che corrisponde a molte situazioni dell'agricoltura svizzera.

Bibliographie

- Arsenault J.-L., Pouleur S., Messier C. & Guay R., 1995. *WinRHIZO*, a root-measuring system with a unique overlap correction method. *HortScience* **30**, 906.
- Braun M., Aschwanden N. & Wütrich-Steiner C., 2001. Abschwemmung von Phosphor. *Agrarforschung* **8** (1), 36–41.
- Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. Cahier de l'environnement n° 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 180 p.
- Gilbert N., 2009. The disappearing nutrient. *Nature* **461**, 716–718.
- Gillingham A. G. & Thorrold B. S. 2000. A review of New Zealand research measuring phosphorus in runoff from pasture. *Journal of Environmental Quality* **29**, 88–96.
- Gahoonia T. S., Nielsen N. E. & Lyshede O. B., 1999. Phosphorus (P) acquisition of cereal cultivars in the field at three levels of P fertilization. *Plant & Soil* **211**, 269–281.
- Levy Häner L., Collaud J.-F., Schwärzel R., Bertossa M., Hiltbrunner J., Anders M., Stoll P., Weisflog T., Scheuner S., Chassot A. & Zürcher J., 2012. Liste recommandée.

Summary

Effects of a new phosphate fertiliser on wheat nutrition and yield

Phosphorus (P) is an essential mineral for plant growth. Given that easily extractable global stocks of P are declining and that P over-fertilisation can be a source of pollution, it would appear necessary to improve the efficiency of phosphate fertilisers in agriculture. Two independent experiments were carried out at Agroscope Changins (Switzerland) and RITTMO-Colmar (France) to compare the efficiency of a fertiliser combining a complexed phosphate with a biostimulant (SSP-TIM) to the currently used phosphate fertiliser, the simple superphosphate (SSP). Each experiment was conducted in a greenhouse under controlled conditions. The experiment in Colmar was conducted on an acidic sandy soil, the one in Changins on a neutral clay soil with a high P-fixing capacity. In both cases, five treatments were compared: a control (no P input) and two different doses for each of the two fertilisers (SSP and SSP-TIM) equivalent to 25 and 50 kg of P_2O_5 per hectare, respectively. On the acidic soil, the SSP-TIM fertiliser at the 25 kg P_2O_5 /ha dose produced a significant increase in total wheat yield 19% higher than that achieved by the SSP fertiliser. On the clay soil, the SSP-TIM also brought a positive of 5% but not significant increase in wheat yield. Results vary according to the stage of development of the plant and the dose of applied fertiliser, among other factors. This study shows that the SSP-TIM fertiliser can be used to good effect in both types of soil, especially when the dose of fertiliser is reduced, which corresponds to numerous agricultural situations in Switzerland.

Key words: phosphorus, fertilizer, agriculture, wheat, environment.

- des variétés de céréales pour la récolte 2013. *Recherche Agronomique Suisse* **3** (6).
- Marschner H., 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants, 2^e édition, 889 p. Academic Press, London.
- R Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. URL <http://www.R-project.org>.
- Roger A., Libohova Z., Rossier N., Joost S., Maltas A., Frossard E. & Sinaj S., 2013. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland. *Geoderma* **217**, 218, 26–36.
- Sharpley A., Foy B. & Withers P., 2000. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: An overview. *Journal of Environmental Quality* **29**, 1–9.
- Sinaj S., Richner W., Flisch R. & Charles R., 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). *Revue Suisse d'Agriculture* **41** (2), 98 p.