

Effets d'un biostimulant foliaire à base de zéolite sur le maïs et le blé d'automne

Mario Fontana¹, Daniele Borgatti^{1,2}, Saïd Elfouki¹, Yves Grosjean¹, Lisa Brancaloni³, Luca Bragazza¹

¹Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

²University of Ferrara, Department of Chemical, Pharmaceutical and Agricultural Sciences, 44121 Ferrara, Italy

³University of Ferrara, Department of Environmental and Prevention Sciences, 44121 Ferrara, Italy

Renseignements: Luca Bragazza, e-mail: luca.bragazza@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs15-176f> Date de publication: 13. Juin 2024



Feuilles de maïs immédiatement après le traitement foliaire avec le biostimulant à base de zéolite. (Photo: Luca Bragazza, Agroscope)

Résumé

Les défis auxquels l'agriculture devra faire face dans les décennies à venir impliquent d'intensifier les rendements et d'optimiser l'efficacité d'utilisation des nutriments tout en minimisant l'empreinte écologique. Les biostimulants constituent une réponse à cette nécessité. Cette étude pionnière vise à tester en champ le biostimulant FertiRoc à base de zéolite pulvérisé trois fois sur du maïs en 2022 puis quatre fois sur du blé d'automne en 2023, tous deux cultivés dans un gradient de fertilisation azotée (de 50 kg N ha⁻¹ à 155 kg N ha⁻¹). La biomasse d'ensilage du maïs et la biomasse de paille du blé, les rendements de grains, les poids de mille grains et les teneurs en nutriments dans les grains ont été mesurés pour les deux cultures. De plus, des mesures de teneur en chlorophylle et du NDVI ont été effectuées durant la croissance des deux cultures. Le biostimulant a permis d'augmenter les rendements de blé et de maïs pour les doses les plus faibles d'engrais azoté, notamment grâce à une augmentation du nombre de grains par m². L'augmentation de l'indice de récolte semble mettre en évidence une intensification de la production. Aucun effet sur le NDVI n'a été observé, tandis que la teneur en chlorophylle a augmenté ponctuellement. Les résultats indiquent aussi une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'azote par le blé d'automne et par le maïs pour les niveaux de fertilisation azotés les plus bas.

Key words: yield, nitrogen, winter wheat, maize, zeolite.

Introduction

Le défi de l'agriculture moderne est d'assurer la sécurité alimentaire d'une population mondiale croissante en réduisant son empreinte environnementale (Clark & Tilman, 2017; Lynch *et al.*, 2021). L'usage des biostimulants pour les végétaux (BS) compte parmi les options permettant d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments et la tolérance au stress abiotique des cultures (Li *et al.*, 2022). Les biostimulants végétaux sont généralement divisés en deux catégories principales. La première comprend les BS d'origine microbienne, tels que les champignons mycorhiziens à arbuscules et les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (Rouphael & Colla, 2020), tandis que la seconde catégorie comprend les BS d'origine non microbienne. On peut distinguer différents types de BS non microbiens: le chitosane, les acides humiques et fulviques, les hydrolysats de protéines animales et végétales, les extraits d'algues et le silicium (Du Jardin, 2015; Sible *et al.*, 2021). Les BS peuvent être enrobés sur les semences, pulvérisés sur les plantes ou épandus sur le sol.

La Commission européenne et le Conseil fédéral suisse ont proposé une définition pour les biostimulants qui ont été inclus comme tels dans la réglementation des engrais (Regulation, 2019; Ordonnance 916.171 sur la mise en circulation des engrais, 2023). Il est précisé que les biostimulants végétaux sont des produits qui stimulent la croissance des plantes et améliorent une ou plusieurs fonctions supplémentaires: l'efficacité de l'utilisation des nutriments, la tolérance au stress abiotique, les caractéristiques qualitatives des cultures et la disponibilité des nutriments dans le sol. Deux catégories sont distinguées selon que le BS est microbien ou non. Les BS sont utilisés depuis des décennies, mais ces dernières années l'offre a fortement augmenté et s'est diversifiée. En effet, le marché des biostimulants est estimé à 3,9 milliards d'USD en 2023 et il est prévu qu'il ait une croissance de 12 % entre 2023 et 2028 (Marketsandmarkets.com, 2024).

La catégorie des biostimulants inorganiques comprend des éléments essentiels ou des sels inorganiques tels que les silicates et les carbonates. Les nanomatériaux naturels siliceux tels que les zéolites font partie de la catégorie des BS inorganiques (Constantinescu-Aruxandei *et al.*, 2020). Les zéolites (plus de 200 types connus) sont des aluminosilicates avec une structure tridimensionnelle composée de tétraèdres de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ et $[\text{AlO}_4]^{5-}$ reliés entre eux et dont les pores sont généralement occupés par des cations échangeables (Mumpton, 1999; Ramesh & Reddy, 2011). La surface interne des zéolites peut at-

teindre plusieurs centaines de m^2 par gramme, ce qui explique la capacité d'échange cationique importante. Lorsqu'elles sont appliquées comme amendement au sol, les zéolites naturelles peuvent améliorer la fertilité (Akbari *et al.*, 2021; Faccini *et al.*, 2018; Ferretti *et al.*, 2024; Roumani & Olf, 2021; Szatanik-Kloc *et al.*, 2021) et la nutrition des plantes (Bernardi *et al.*, 2016; Medoro *et al.*, 2022; Mehrab *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2020). Toutefois, les études sur l'utilisation de la zéolite naturelle comme BS en application foliaire sont sporadiques (par exemple, Conversa *et al.*, 2024; El-Gabiery & Ata Allah, 2017; Moale *et al.*, 2021; Petoumenou, 2023) et, à notre connaissance, aucune étude sur des cultures en plein champ n'a été réalisée.

Une récente étude en serre a montré des effets positifs de l'application foliaire d'un biostimulant à base de zéolite pour la plante ainsi que dans le sol pour des cultures de blé d'hiver et de maïs (Quezada & Bragazza, 2024). Sur la base de ces résultats, la présente étude évalue l'effet de l'application foliaire de la zéolite sur le maïs et le blé d'hiver en plein champ dans un gradient de fertilisation azotée durant les années 2022 et 2023. Les objectifs sont de tester si l'application d'un biostimulant à base de zéolite peut: 1) augmenter les rendements en grains; 2) améliorer l'utilisation de l'azote, surtout pour les niveaux de fertilisation azotée les plus faibles.

Matériel et méthodes

Site d'étude et design expérimental

L'expérience a été réalisée sur le domaine expérimental d'Agroscope à Nyon (46°24'05.28"N, 06°14'07.47"E, altitude 432 m) durant les saisons 2022 et 2023. Le climat du site d'étude est caractérisé par une température annuelle moyenne de 11 °C et par une précipitation annuelle de 1004 mm. Le sol est un Calcaric Cambisol avec 200 g kg^{-1} d'argile, 345 g kg^{-1} de sable pour un pH de 7,3 dans la couche superficielle (0–20 cm). Du maïs (*Zea mays* L.) de la variété LG31226 a été semé le 28.04.2022 et récolté le 13.09.2022 avec une densité de semis de 9,6 grains m^{-2} (largeur de l'inter-rang = 75 cm). Ensuite, du blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) de la variété Arina a été semé le 28.10.2022 et récolté le 13.07.2023 avec une densité de semis de 450 grains m^{-2} .

Le plan expérimental peut être décrit comme un «split-plot design» composé de quatre blocs et de 24 parcelles (5 m × 11 m) au total. Deux facteurs expérimentaux ont été pris en compte: le niveau de fertilisation azotée et l'apport foliaire de zéolite. L'azote a été apporté selon

quatre niveaux: N50 (50 kg N ha⁻¹), N85 (85 kg N ha⁻¹), N120 (120 kg N ha⁻¹) et N155 (155 kg N ha⁻¹). L'azote a été fourni sous forme de nitrate d'ammonium (NH₄NO₃) pour les traitements N50 et N120, tandis qu'il était sous forme de nitrate d'ammonium combiné à du fumier de bovin dont l'apport d'azote correspondant était de 35 kg N ha⁻¹ pour les traitements N85 (50+35 kg ha⁻¹) et N155 (120+35 kg ha⁻¹). Pour le maïs, quatre parcelles (réplicas) ont été mises en place pour chacun des niveaux de fertilisation azotée. Pour le blé, les niveaux N50 et N120 comprenaient huit parcelles tandis que les niveaux N85 et N155 comprenaient quatre parcelles. Pour chaque niveau d'azote, la zéolite (+Z) a été appliquée par pulvérisation foliaire sur la moitié de la parcelle (5 m × 5,5 m, sous-parcelle), tandis que l'autre moitié de la parcelle a reçu la même quantité d'eau sans zéolite (Contrôle ou -Z). Au total, le plan expérimental comprenait huit traitements (50-Z, 50+Z, 85-Z, 85+Z, 120-Z, 120+Z, 155-Z, 155+Z) avec 32 et 48 sous-parcelles respectivement pour

le maïs et le blé d'automne. Pour le blé, trois apports d'azote et quatre apports de zéolite ont été effectués (Fig. 1) tandis que deux apports d'azote et trois apports de zéolite ont été effectués pour le maïs. Pour la fertilisation en potassium et en phosphore, on a utilisé du superphosphate triple 46 % P₂O₅ [Ca(H₂PO₄)] et du potassium granulaire 60 % K₂O [KCl] comme engrais conformément aux normes de fertilisation pour le blé d'hiver et le maïs (Sinaj *et al.*, 2017).

Application foliaire du biostimulant à base de zéolite

Le biostimulant utilisé dans cette étude est le produit FertiRoc®, un biostimulant à base de zéolite naturelle (chabazite) mélangée à une proportion de carbonate de calcium tendre naturel. La composition est micronisée et travaillée extrêmement finement selon le savoir-faire de la société productrice Power the Nature SA (Lausanne-Suisse et Paris-France). Le produit FertiRoc® a été validé par un organisme certificateur et accepté comme

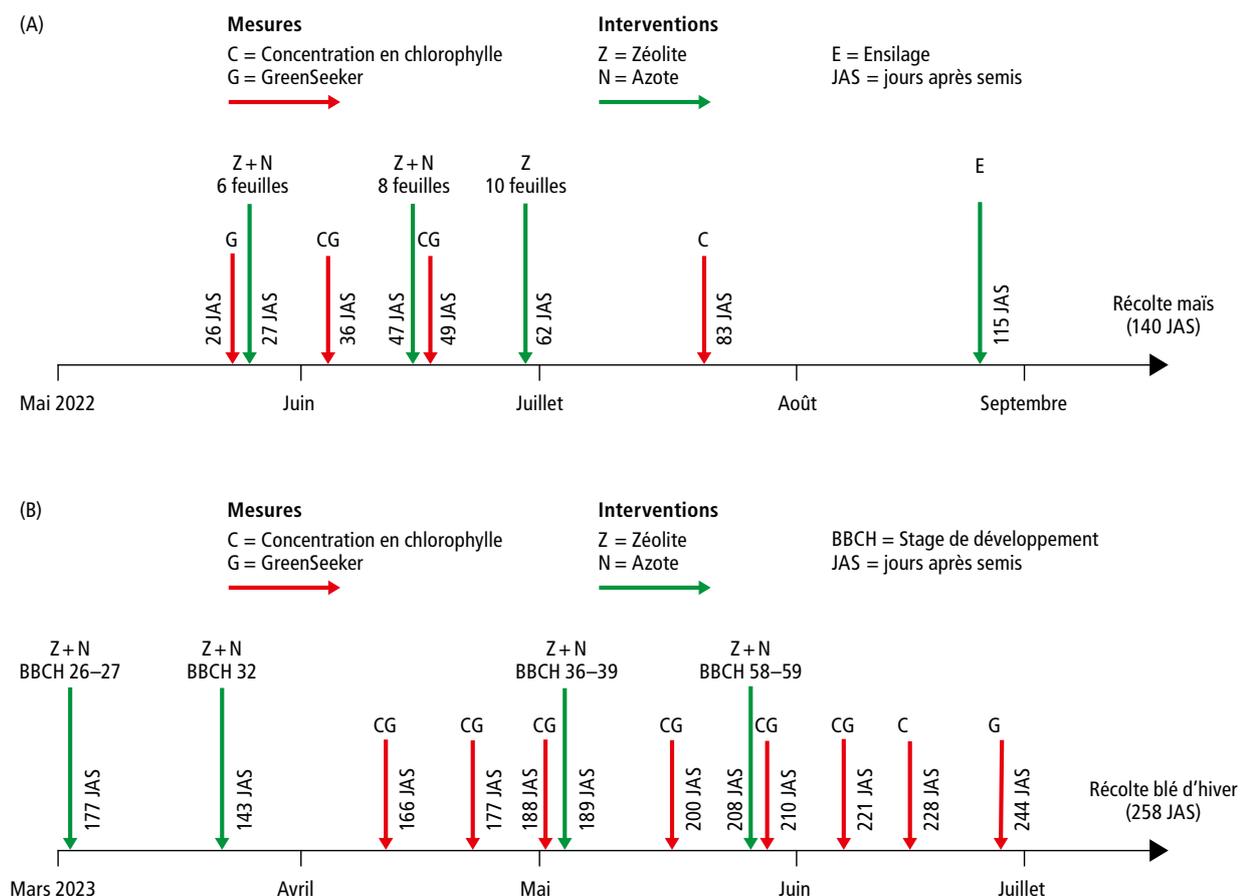


Figure 1 | Indication (flèches vertes) de la date de fertilisation azotée (N) et des applications foliaires du biostimulant à base de zéolite (Z) au cours de la saison de croissance 2022 pour le maïs et la saison 2023 pour le blé d'automne. Les flèches rouges indiquent les dates des mesures de la teneur en chlorophylle (C) au niveau des feuilles ainsi que du NDVI au niveau de la communauté (G). Les nombres de jours après la date de semis (28.04.2022 pour le maïs et le 28.10.2022 pour le blé d'hiver) sont indiqués (JAS) pour chaque intervention agronomique et chaque mesure, tandis que les stades phénologiques (échelle BBCH) se rapportent aux dates d'application du biostimulant.

biostimulant au sens du règlement UE 2019/1009, cela implique que les caractéristiques biostimulantes du produit ne sont pas liées à son contenu en éléments nutritifs. La poudre de zéolite a été mélangée à de l'eau et appliquée à la main à l'aide d'un pulvérisateur à moteur. Le biostimulant a été appliqué quatre fois pour le blé et trois fois pour le maïs. Les doses correspondantes pour le blé étaient: 1,5 - 1,5 - 2,0 et 2,0 kg FertiRoc®/ha/300L d'eau. Les trois premières applications ont suivi les apports d'azote aux stades phénologiques (BBCH) suivants: 26–27, 32, 36–39. Une quatrième application a été effectuée au stade BBCH 58–59. Pour le maïs, les trois applications foliaires ont été effectuées aux stades six feuilles étalées (BBCH 16), huit feuilles étalées (BBCH 18) et dix feuilles étalées (BBCH 19) et les doses du biostimulant correspondantes étaient: 3,0 – 3,0 et 2,0 kg FertiRoc®/ha/300L d'eau. Les applications foliaires ont systématiquement été suivies d'au moins deux jours sans pluie.

Mesures périodiques non destructives en plein champ

La teneur en chlorophylle (Fig. 1) a été périodiquement mesurée à l'aide du «chlorophyll meter» CL-01 (Hansatech Instruments) sur la dernière feuille complètement développée de quatre plants de blé et sur deux plants de maïs représentatifs de chaque parcelle. L'instrument GreenSeeker (Trimble) a été utilisé pour les mesures périodiques du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) en «balayant» la surface de chaque parcelle à l'aide de quatre mesures et en maintenant l'instrument à une distance d'environ 60 à 80 cm de la culture (Fig. 1). La moyenne du NDVI a ensuite été calculée pour chaque parcelle.

Récolte des grains, biomasse végétale et analyse des nutriments

Pour le maïs, la récolte de la biomasse pour ensilage a eu lieu le 17.08.2022 sur une surface de 1 m² et la récolte des grains a été effectuée le 13.09.2022 avec une batteuse expérimentale sur une bande centrale de 2,25 m de large dans chaque parcelle (5,5 m de long). Pour le blé, la récolte des grains et de la paille a eu lieu le 13.07.23 avec une batteuse expérimentale sur une bande centrale de 2,2 m de large dans chaque parcelle (5,5 m de long). Le rendement était exprimé à un taux d'humidité standard de 14,0 % pour le maïs et 14,5 % pour le blé. La détermination de la concentration en azote des grains a été réalisée selon la méthode Dumas (NF ISO 13 878). La détermination des autres macronutriments (calcium, magnésium, potassium et phosphore) a été effectuée après minéralisation à l'eau régale suivi d'une analyse ICP-MS.

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du programme R 3.01 (Team 2013). Pour chaque niveau de fertilisation, les données des traitements avec et sans biostimulant ont été comparées à l'aide de t-tests pairés pour chacune des parcelles (pour prendre en considération l'hétérogénéité du champ) en utilisant la fonction t.test.

Résultats et discussion

Pour la dose de fertilisation azotée la moins élevée (50 kg N ha⁻¹), l'application foliaire du biostimulant a augmenté les rendements en grains de 7 % pour le blé d'automne et 5 % pour le maïs (Fig. 2). Pour la dose de fertilisation à 85 kg N ha⁻¹, nous avons pu observer une augmentation du rendement en grains de 6 % pour le blé et de 9 % pour le maïs, avec des réponses significa-

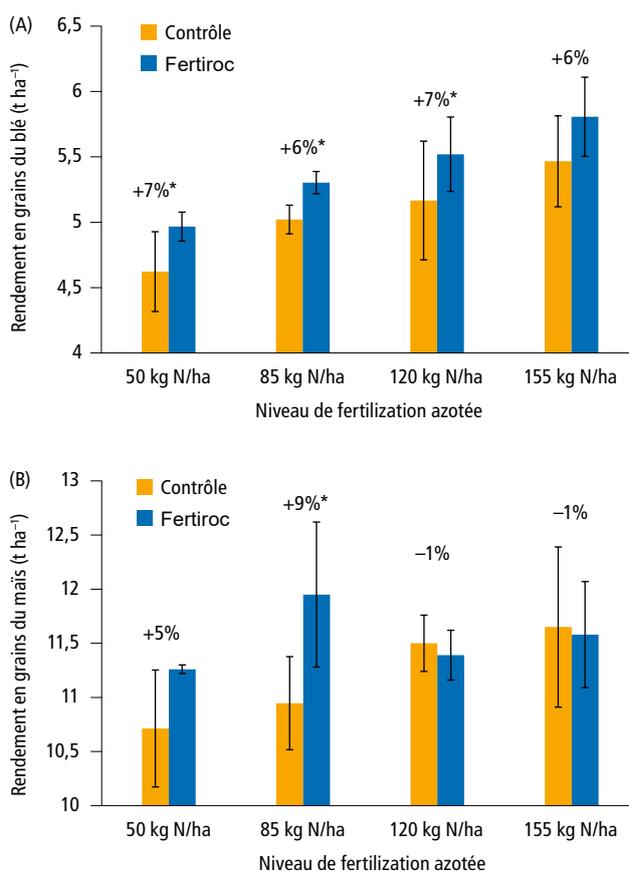


Figure 2 | Moyenne (± écart type) du rendement en grain du blé d'automne (A) et du maïs (B) pour les quatre différents niveaux de fertilisation azotée en réponse à l'apport foliaire du biostimulant à base de zéolite. La différence moyenne en pourcentage entre le contrôle et le traitement est aussi précisée. L'astérisque indique une différence significative ($p < 0,05$) entre le contrôle et le traitement pour chaque niveau de fertilisation azotée.

tives pour les deux cultures. Pour les doses de fertilisation azotée de 120 kg N ha⁻¹ et 155 kg N ha⁻¹, le rendement de blé a augmenté de 7 % et 6 %, respectivement, tandis qu'aucun effet sur le rendement n'a été observé pour le maïs. Ces premiers essais en plein champ suggèrent que: 1) la réponse du rendement au biostimulant est spécifique à la culture, avec le blé d'hiver qui semble plus réactif que le maïs, et 2) l'effet du biostimulant est plus important à des doses plus faibles d'apport d'azote. Bien que plusieurs études aient mis en évidence l'augmentation de la productivité en réponse à l'application de biostimulants (Bulgari *et al.*, 2015; Del Buono, 2021; Drobek *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2022), à notre connaissance, il n'existe toujours pas de données sur la réponse des grandes cultures à l'application en plein champ d'un biostimulant à base de zéolite.

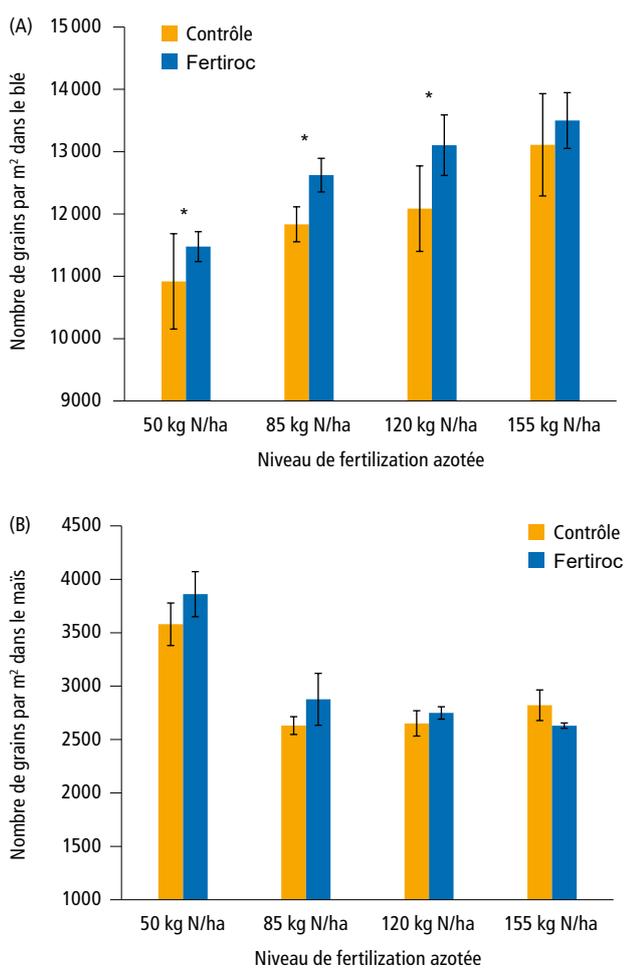


Figure 3 | Moyenne (\pm écart type) du nombre de grains par m² du blé d'automne (A) et du maïs (B) pour les quatre différents niveaux de fertilisation azotée en réponse à l'apport foliaire du biostimulant. L'astérisque indique une différence significative ($p < 0,05$) entre le contrôle et le traitement pour chaque niveau de fertilisation azotée.

L'application du biostimulant a aussi augmenté le nombre de grains de blé d'automne par m² de 6 % en moyenne sur l'ensemble du gradient de fertilisation azotée (Fig. 3). Le fait que les applications foliaires aient été effectuées après le tallage (Fig. 1) suggère que c'est plutôt le nombre de grains par épi que le nombre d'épis au m² qui a augmenté, à l'image de l'effet d'autres biostimulants foliaires qui peuvent augmenter le nombre de grains par épi de blé (Szczepanek & Grzybowski, 2016). De façon similaire, le nombre de grains de maïs par m² a augmenté de 7,9 % et de 9,3 % pour les doses de fertilisation azotée de 50 kg N ha⁻¹ et 85 kg N ha⁻¹, mais à la différence du blé, de façon non significative (Fig. 3). De plus, l'augmentation du rendement suite à l'application du biostimulant n'a pas conduit à une diminution du poids de mille grains (PMG) ni pour le blé ni pour le maïs (Tableau 1), comme généralement observé dans d'autres études suite à une augmentation du nombre de grains par m² (Acreche & Slafer, 2006; Lenoir *et al.*, 2023). Au contraire, pour la fertilisation à 50 kg N ha⁻¹, la hausse du rendement de blé grâce au biostimulant a également été favorisée par un PMG significativement plus élevé (Tableau 1), en plus de l'augmentation du nombre de grains par m² (Fig. 3). Le nombre de grains de blé par m² plus faible avec 50 kg N ha⁻¹ comparativement aux doses plus élevées de fertilisation azotée a possiblement diminué la compétition entre les grains et a ainsi facilité une augmentation de PMG suite à l'application du biostimulant.

L'application du biostimulant à base de zéolite a diminué la production de biomasse de paille de blé de 4 % en moyenne sur l'ensemble du gradient de fertilisation azotée et cette diminution a été significative avec 85 kg N ha⁻¹ et 155 kg N ha⁻¹ (Tableau 1). En revanche, aucun effet de l'application du biostimulant à base de zéolite n'a été observé sur la production de biomasse pour l'ensilage du maïs (Tableau 1).

Sur l'ensemble du gradient de fertilisation, on observe que l'indice de récolte du blé d'automne passe d'une valeur moyenne de 0,45 sans biostimulant à 0,48 après l'application du biostimulant FertiRoc®, ce qui correspond à une augmentation d'environ 6,3 % (Fig. 4). Une augmentation plus prononcée a été observée pour les niveaux plus bas de fertilisation azotée (50 kg N ha⁻¹ et 85 kg N ha⁻¹), entraînant une augmentation relative du rendement en grains et une réduction plus marquée de la production de paille que pour les niveaux de fertilisation plus élevés (Fig. 2, Tableau 1). Pour le maïs, l'indice de récolte a augmenté (non significativement) de manière plus faible de 0,47 à 0,48 avec l'apport du biostimulant (Fig. 4). L'augmentation de l'indice de récolte

est souvent lié à une augmentation des fleurons distaux (Evans & Fischer, 1999). À titre comparatif, l'application foliaire de zéolite sur le coriandre a augmenté le nombre d'ombelles par plante ainsi que leur hauteur (Mahmoud *et al.*, 2023). Une étude plus approfondie de l'influence du biostimulant à base de zéolite sur le nombre de fleurs par épi, la croissance de l'épi et la distribution des grains par épi serait nécessaire pour mettre en évidence la manière dont l'application foliaire du biostimulant modifie les composantes du rendement.

Aucun changement de la concentration en azote dans les grains n'a été observé suite à l'application du biostimulant à base de zéolite, ni pour le blé ni pour le maïs (Tableau 2). Ainsi, même lorsque la production de grains a augmenté (Fig. 2), il n'y a pas eu de dilution de la concentration en azote, un résultat important concernant la valeur qualitative (= teneur en protéines) des grains de blé et de maïs. Pour le maïs, des dilutions des concentrations de P, K, Ca et Mg ont été observées uniquement pour la dose de fertilisation la plus faible (50 kg N ha⁻¹). En revanche, aucune dilution des macronutriments n'a été observée pour le blé. De façon surprenante, la dose de fertilisation de 120 kg N ha⁻¹ en combinaison avec la zéolite s'est singularisée par une augmentation significative de la teneur en K, en Ca et en Mg ($p < 0,05$) dans les grains de blé (Tableau 2).

La quantité d'azote exportée par les grains de blé d'automne a augmenté de 6,5 % dans l'ensemble du gradient de fertilisation azotée (Fig. 5) tandis qu'une augmentation de 3 % et de 10 % a été observée pour les grains de maïs respectivement pour les doses de fertilisation de 50 kg N ha⁻¹ et 85 kg N ha⁻¹. De façon similaire, une augmentation de l'exportation a déjà été mise en évidence dans un essai en serre pour le blé et le maïs (Quezada & Bragazza, 2024). L'augmentation de l'exportation d'azote pourrait avoir des conséquences environnementales importantes si elle entraîne une diminution de la perte d'azote fournie par l'engrais chimique. Aus-

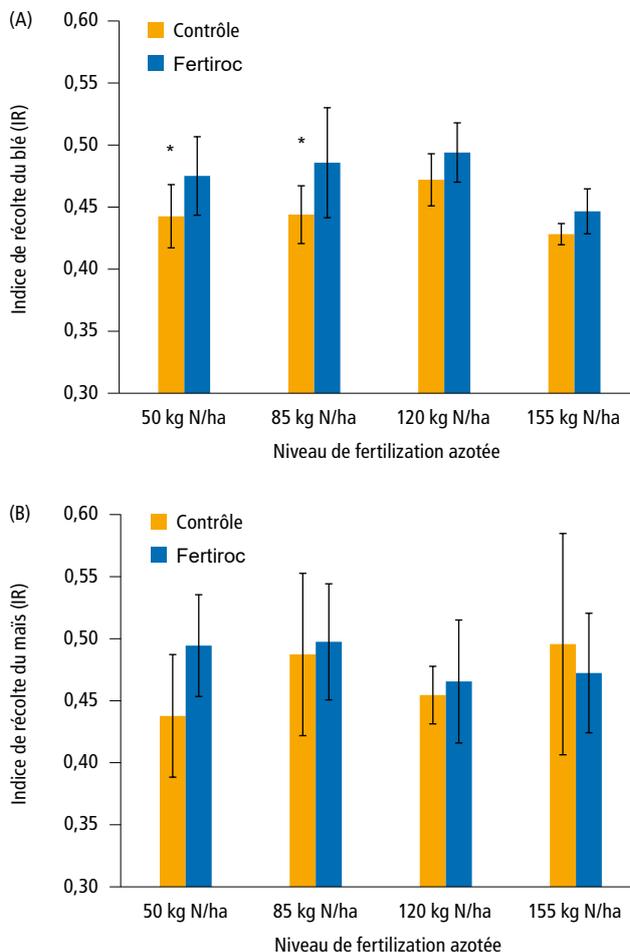


Figure 4 | Valeur moyenne (\pm écart type) de l'indice de récolte du blé d'automne (A) et du maïs (B) dans les quatre différents niveaux de fertilisation azotée en réponse à l'apport foliaire du biostimulant. L'astérisque indique une différence significative ($p < 0,05$) entre le contrôle et le traitement avec la zéolite pour chaque niveau de fertilisation azotée.

si, pour le blé fertilisé à 120 kg N ha⁻¹ et pour le maïs fertilisé à 85 kg N ha⁻¹, des augmentations significatives ($p < 0,05$) d'exportation de P (+9,1 % et +13,9 %), K (+10,8 % et +13,7 %) et Mg (+10,2 % et +16,2 %) ont été

Tableau 1 | Poids de mille grains (PMG), biomasse de paille et d'ensilage du blé d'hiver et du maïs pour les quatre niveaux de fertilisation azotée (N) dans le contrôle et dans les traitements foliaires avec le biostimulant à base de zéolite. Les lettres indiquent une différence significative ($p < 0,05$) après comparaison par t.test.

Fertilisation azotée	Blé d'hiver (année 2023)				Maïs (année 2022)			
	Poids de mille grains (g)		Paille (t ha ⁻¹)		Poids de mille grains (g)		Ensilage (t ha ⁻¹)	
	Contrôle	Fertiroc	Contrôle	Fertiroc	Contrôle	Fertiroc	Contrôle	Fertiroc
N = 50 kg ha ⁻¹	42,4 B	43,3 A	5,9 A	5,6 A	299 A	293 A	24,8 A	23,0 A
N = 85 kg ha ⁻¹	42,4 A	42,0 A	6,4 A	5,8 B	416 A	417 A	22,8 A	24,2 A
N = 120 kg ha ⁻¹	42,7 A	42,1 A	5,8 A	5,7 A	435 A	414 B	25,5 A	24,8 A
N = 155 kg ha ⁻¹	41,7 A	43,0 A	7,3 A	7,2 B	413 B	440 A	24,3 A	25,2 A

Tableau 2 | Effet de l'application foliaire du biostimulant à base de zéolite sur la concentration moyenne des macronutriments (azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium) dans les grains de blé d'hiver et de maïs pour les différentes doses de fertilisation azotée. Les lettres indiquent une différence significative ($p < 0,05$).

Culture	Niveau de fertilisation azotée	N (%)		P (%)		K (%)		Ca (‰)		Mg (%)	
		Contrôle	Fertiroc								
Blé d'automne	N = 50 kg ha ⁻¹	2,04 A	2,01 A	0,420 A	0,425 A	0,495 A	0,456 A	0,534 A	0,540 A	0,124 A	0,126 A
	N = 85 kg ha ⁻¹	2,06 A	2,04 A	0,432 A	0,424 A	0,454 A	0,441 A	0,528 A	0,530 A	0,129 A	0,127 A
	N = 120 kg ha ⁻¹	2,29 A	2,34 A	0,424 B	0,436 A	0,427 B	0,447 A	0,561 B	0,589 A	0,125 B	0,131 A
	N = 155 kg ha ⁻¹	2,27 A	2,27 A	0,421 A	0,412 A	0,433 A	0,415 A	0,565 A	0,560 A	0,124 A	0,123 A
Maïs	N = 50 kg ha ⁻¹	1,25 A	1,23 A	0,243 A	0,226 B	0,394 A	0,379 B	0,105 A	0,080 B	0,968 A	0,900 B
	N = 85 kg ha ⁻¹	1,30 A	1,32 A	0,212 A	0,221 A	0,350 A	0,363 A	0,073 A	0,068 A	0,843 A	0,090 B
	N = 120 kg ha ⁻¹	1,33 A	1,32 A	0,240 A	0,221 A	0,379 A	0,364 A	0,080 A	0,073 A	0,970 A	0,885 A
	N = 155 kg ha ⁻¹	1,36 A	1,37 A	0,218 A	0,221 A	0,365 A	0,365 A	0,070 A	0,070 A	0,900 A	0,925 A

observées. Ces résultats suggèrent que c'est l'absorption en nutriment dans son ensemble qui peut être favorisée par le biostimulant à base de zéolite. À titre d'exemple, pour l'ensemble du gradient de fertilisation azotée, le biostimulant a permis d'exporter dans les grains de blé 7,59 kg N ha⁻¹, 1,58 kg P ha⁻¹, 1,67 kg K ha⁻¹ de plus que le contrôle alors que seulement 5 g N ha⁻¹, 7,7 g P ha⁻¹, et 83 g K ha⁻¹ ont été apportés directement via l'application du biostimulant. Ces résultats laissent ainsi entrevoir une perspective intéressante pour l'économie d'engrais en améliorant l'absorption grâce à l'effet du biostimulant. Néanmoins, l'effet de la zéolite sur l'absorption des nutriments autres que N n'a, à notre connaissance, jamais été étudié. Comparativement, dans d'autres études il a été montré que l'application foliaire de biostimulants à base d'acide aminés avec des microéléments a augmenté la concentration de Cu, Ns, Ca et Mo dans les grains de blé d'hiver, en plus d'augmenter le rendement d'un ordre de grandeur similaire à nos observations (Popko *et al.*, 2018).

En vue d'élucider les mécanismes d'action du biostimulant, de nombreuses mesures non-destructives liées à la photosynthèse ont été effectuées durant la saison de croissance (Fig. 1). Les mesures périodiques de NDVI n'ont pas montré de différences significatives entre les traitements avec et sans le biostimulant, pour le blé comme pour le maïs (données non présentées). Dans l'ensemble de l'expérimentation, la chlorophylle a augmenté de manière significative ($p < 0,05$) pour le blé et pour le maïs de façon très isolée, c'est-à-dire uniquement pour une date et pour un seul traitement. À titre de comparaison, l'application de la zéolite sur de la coriandre a permis d'augmenter la teneur en chlorophylle

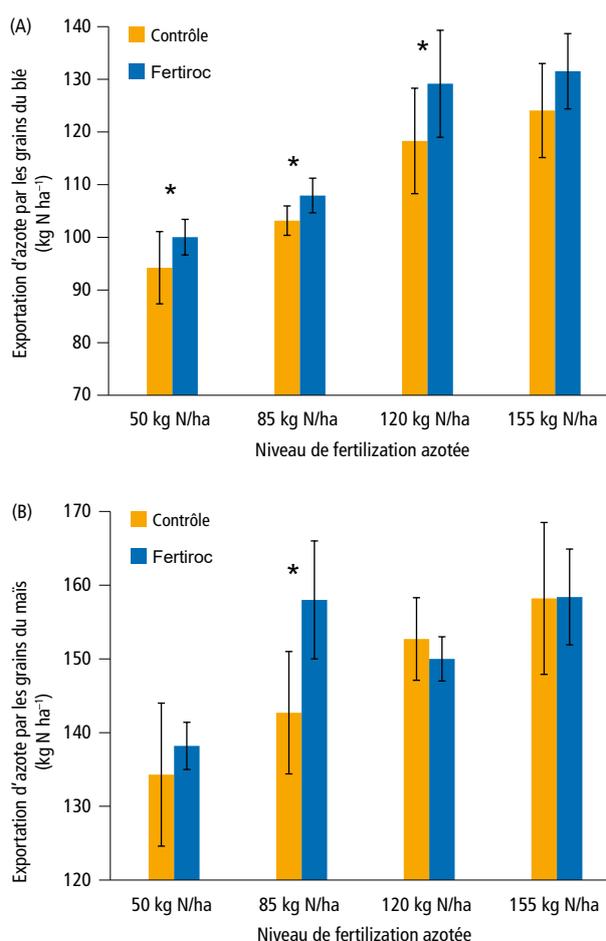


Figure 5 | Valeur moyenne (\pm écart type) de l'exportation d'azote par les grains du blé d'automne (A) et du maïs (B) dans les quatre différents niveaux de fertilisation azotée en réponse à l'apport foliaire du biostimulant à base de zéolite. L'astérisque indique une différence significative ($p < 0,05$) entre le contrôle et le traitement avec la zéolite pour chaque niveau de fertilisation azotée.

(Mahmoud *et al.*, 2023). Dans l'ensemble, l'effet d'une pulvérisation de zéolite sur les propriétés photosynthétiques est très mal compris et reste à élucider. Il est probable que le biostimulant puisse influencer les cultures à travers une combinaison d'effets « directs » liés au dépôt de la zéolite sur les feuilles et « indirects » liés à une modification de métabolisme de la plante (Quezada & Bragazza, 2024).

Conclusion

Dans l'ensemble, les résultats de ce premier essai en plein champ d'applications foliaires du produit FertiRoc® comme biostimulant à base de zéolite en combinaison avec différentes doses de fertilisation azotée semblent prometteurs. Les données collectées pour l'année 2022 et 2023 sur la station de recherche d'Agroscope-Nyon ont montré une augmentation moyenne du rendement de grain en blé d'hiver (variété Arina) de 6,7 % sur l'ensemble du gradient de fertilisation azotée (de 50 à 155 kg N ha⁻¹) et du rendement de maïs (variété LG31226) de 7,2 % pour les doses de fertilisation azotées les plus basses (50 et 85 kg N ha⁻¹). Pour ces mêmes doses de fertilisation azotée, les indices de récolte ont également augmenté de 6,3 % pour le blé et de 7,2 % pour le maïs. Nous avons aussi observé une augmentation de l'exportation d'azote dans les grains car aucune dilution de la concentration n'a été observée dans les

grains suite à l'application du biostimulant. Ces résultats indiquent une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'azote pour le blé et le maïs, surtout pour les niveaux de fertilisation azotés les plus bas. Ceci pourrait permettre de réduire la quantité de fertilisant azoté d'une culture ayant reçu un apport foliaire du biostimulant tout en maximisant l'exportation de N ce qui, de surcroît, aurait l'avantage de réduire les pertes environnementales d'azote. De futures études sont toutefois nécessaires non seulement pour confirmer ces résultats avec d'autres conditions pédoclimatiques et pour d'autres cultures, mais aussi pour mieux comprendre les mécanismes métaboliques et écophysologiques de réponse à l'application du biostimulant. Enfin, un bilan technico-économique de l'utilisation du biostimulant permettrait de comparer, selon la culture et le site, le gain économique d'une réduction de fertilisation azotée et/ou d'une augmentation de productivité avec le coût de l'application du biostimulant. ■

Remerciements

Cette recherche a été financée par «Power the Nature» et fait partie de l'activité de recherche d'Agroscope dans le cadre du Programme d'activité 2022–2025. Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt. Le bailleur de fonds «Power the Nature» n'a joué aucun rôle dans la conception de l'étude, dans la collecte, l'analyse ou l'interprétation des données, dans la rédaction du manuscrit ou dans la décision de publier les résultats.

References

- Acreche, M. M., & Slafer, G. A. (2006). Grain weight response to increases in number of grains in wheat in a Mediterranean area. *Field Crops Research*, *98*(1), 52–59.
- Akbari, H., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Heidarzadeh, A. (2021). Fertilizer systems deployment and zeolite application on nutrients status and nitrogen use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, *44*(2), 196–212.
- Bernardi, A. de C., Polidoro, J. C., Monte, M. de M., Pereira, E. I., de Oliveira, C. R., & Ramesh, K. (2016). Enhancing nutrient use efficiency using zeolites minerals: A review. *Advances in Chemical Engineering and Science* *6*, 295–304.
- Bulgari, R., Cocetta, G., Trivellini, A., Vernieri, P., & Ferrante, A. (2015). Biostimulants and crop responses: A review. *Biological Agriculture & Horticulture*, *31*(1), 1–17.
- Clark, M., & Tilman, D. (2017). Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, *12*(6), 064016.
- Constantinescu-Aruxandei, D., Lupu, C., & Oancea, F. (2020). Siliceous Natural Nanomaterials as Biorationals - Plant Protectants and Plant Health Strengtheners. *Agronomy*, *10*(11), 1791.
- Conversa, G., Pacifico, S., La Rotonda, P., Lazzizzera, C., Bonasia, A., & Elia, A. (2024). Foliar application of natural zeolites affects the growth and productivity of processing tomato. *European Journal of Agronomy*, *154*, 127100.
- Del Buono, D. (2021). Can biostimulants be used to mitigate the effect of anthropogenic climate change on agriculture? It is time to respond. *Science of the Total Environment*, *751*, 141763.
- Drobek, M., Frc, M., & Cybulska, J. (2019). Plant biostimulants: Importance of the quality and yield of horticultural crops and the improvement of plant tolerance to abiotic stress – A review. *Agronomy*, *9*(6), 335.
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, *196*, 3–14.
- El-Gabiery, A., & Ata Allah, Y. (2017). Effect of foliar application with Bentonite on growth and productivity of Egyptian cotton. *Journal of Plant Production*, *8*(10), 1029–1035.
- Evans, L., & Fischer, R. (1999). Yield potential: Its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, *39*(6), 1544–1551.
- Faccini, B., Di Giuseppe, D., Ferretti, G., Coltorti, M., Colombani, N., & Masciocco, M. (2018). Natural and NH₄⁺-enriched zeolite amendment effects on nitrate leaching from a reclaimed agricultural soil (Ferrara Province, Italy). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *110*, 327–341.
- Ferretti, G., Rosinger, C., Diaz-Pines, E., Faccini, B., Coltorti, M., & Keiblinger, K. M. (2024). Soil quality increases with long-term chabazite-zeolite tuff amendments in arable and perennial cropping systems. *Journal of Environmental Management*, *354*, 120303.

- Lenoir, A., Slafer, G. A., Siah, A., & Dumont, B. (2023). Plasticity of wheat yield components in response to N fertilization. *European Journal of Agronomy*, **150**, 126933.
- Li, J., Van Gerrewey, T., & Geelen, D. (2022). A meta-analysis of biostimulant yield effectiveness in field trials. *Frontiers in Plant Science*, **13**, 836702.
- Lynch, J., Cain, M., Frame, D., & Pierrehumbert, R. (2021). Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO₂-emitting sectors. *Frontiers in sustainable food systems*, **4**, 518039.
- Mahmoud, A. W. M., Rashad, H. M., Esmail, S. E., Alsamadany, H., & Abdel-daym, E. A. (2023). Application of silicon, zinc, and zeolite nanoparticles – A tool to enhance drought stress tolerance in coriander plants for better growth performance and productivity. *Plants*, **12**(15), 2838.
- Marketsandmarkets.com. (2024). Biostimulants Market by Crop Type (Cereals and Grains, Oilseeds and Pulses, Fruits & Vegetables, Flowers & Ornamentals), Active Ingredient (Humic Substances, Seaweed Extracts.), Application Method, Form, and Region -Global Forecast to 2028). Available online: <https://www.marketsandmarkets.com> (accessed on 08 March 2024).
- Medoro, V., Ferretti, G., Galamini, G., Rotondi, A., Morrone, L., Faccini, B., & Coltorti, M. (2022). Reducing nitrogen fertilization in olive growing by the use of natural chabazite-zeolite as soil improver. *Land*, **11**(9), 1471.
- Mehrab, N., Chorom, M., & Hojati, S. (2016). Effect of raw and NH₄⁺-enriched zeolite on nitrogen uptake by wheat and nitrogen leaching in soils with different textures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **47**(10), 1306–1316.
- Moale, C., Ghiurea, M., Sîrbu, C. E., Somoghi, R., Cioroianu, T. M., Faraon, V. A., Lupu, C., Trică, B., Constantinescu-Aruxandei, D., & Oancea, F. (2021). Effects of siliceous natural nanomaterials applied in combination with foliar fertilizers on physiology, yield and fruit quality of the apricot and peach trees. *Plants*, **10**(11), 2395.
- Mumpton, F. A. (1999). La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **96**(7), 3463–3470.
- Ordonnance 916.171 sur la mise en circulation des engrais (Ordonnance sur les engrais, OEng). Le Conseil fédéral suisse. Pub. L. No. 916.171 (2023).
- Petoumenou, D. G. (2023). Enhancing yield and physiological performance by foliar applications of chemically inert mineral particles in a rainfed vineyard under Mediterranean conditions. *Plants*, **12**(7), 1444.
- Popko, M., Michalak, I., Wilk, R., Gramza, M., Chojnacka, K., & Górecki, H. (2018). Effect of the new plant growth biostimulants based on amino acids on yield and grain quality of winter wheat. *Molecules*, **23**(2), 470.
- Quezada, J. C., & Bragazza, L. (2024). Foliar applications of a zeolite-based biostimulant affect soil enzyme activity and N uptake in maize and wheat under different levels of nitrogen fertilization. *Journal of Plant Nutrition*, **47**(3), 501–513.
- Ramesh, K., & Reddy, D. D. (2011). Zeolites and their potential uses in agriculture. *Advances in Agronomy*, **113**, 219–241.
- Regulation, E. (2019). 1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003. 2019. *J. Eur. Union*, **170**, 1-114.
- Roumani, A., & Olf, H.-W. (2021). Nitrogen leaching and N use efficiency after application of zeolite and the nitrification inhibitor DMPP in a pot experiment with spring wheat. *Journal of Plant Nutrition*, **44**(15), 2191–2200.
- Roupheal, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, **11**, 511937.
- Sible, C. N., Seebauer, J. R., & Below, F. E. (2021). Plant biostimulants: A categorical review, their implications for row crop production, and relation to soil health indicators. *Agronomy*, **11**(7), 1297.
- Sinaj, S., Charles, R., Baux, A., Dupuis, B., Hiltbrunner, J., Levy, L., Pellet, D., Blanchet, G., & Jeangros, B. (2017). 8/Fertilisation des grandes cultures. Principes De Fertilisation Des Cultures Agricoles En Suisse (PRIF 2017). *Recherche Agronomique Suisse*, **8**(6), 1–9.
- Szatanik-Kloc, A., Szerement, J., Adamczuk, A., & Józefaciuk, G. (2021). Effect of low zeolite doses on plants and soil physicochemical properties. *Materials*, **14**(10), 2617.
- Szczepanek, M., & Grzybowski, K. (2016). Yield and macronutrient accumulation in grain of spring wheat (*Triticum aestivum* ssp. *Vulgare* L.) as affected by biostimulant application. *Adv. Crop Sci. Tech*, **4**(228), 10-4172.
- Wu, Q., Wang, Y., Chen, T., Zheng, J., Sun, Y., & Chi, D. (2020). Soil nitrogen regulation using clinoptilolite for grain filling and grain quality improvements in rice. *Soil and Tillage Research*, **199**, 104547.