

Application foliaire d'un biostimulant à base de zeolite sous différents niveaux de fertilisation azotée, Effets sur l'activité enzymatique du sol et l'absorption de l'azote dans le maïs et le blé.

Juan Carlos Quezada & Luca Bragazza

Pour citer cet article : Juan Carlos Quezada & Luca Bragazza (22 Nov 2023) : 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, DOI : [10.1080/01904167.2023.2280124](https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2280124).

Pour faire un lien vers cet article : <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2280124>



2023 Agroscope. Publié sous licence par Taylor & Francis Group, LLC



Publié en ligne : 22 Nov 2023.



Soumettez votre article à ce journal [↗](#)



Voir les articles connexes [↗](#)



Voir les données de [Crossmark](#) [↗](#)



Les applications foliaires d'un biostimulant à base de zéolite affectent l'activité enzymatique du sol et l'absorption de l'azote dans le maïs et le blé sous différents niveaux de fertilisation azotée.

Juan Carlos Quezada^{a,b,c} et Luca Bragazza 

^aAgroscope, Field-Crop Systems and Plant Nutrition, Nyon, Suisse ;^b Asian School of Environment, Nanyang Technological University, Singapour ;^c Nestle Institut des sciences agronomiques, Lausanne, Suisse

RÉSUMÉ

Le développement de pratiques agricoles susceptibles d'améliorer les performances des cultures tout en préservant les ressources naturelles suscite un intérêt croissant. On pense que les biostimulants végétaux peuvent jouer un rôle dans la réalisation de cet objectif, notamment en augmentant l'efficacité de l'utilisation de l'azote. Cependant, il existe une lacune notable dans la recherche concernant les effets des applications foliaires de zéolithes naturelles en tant que biostimulants végétaux sur les performances des cultures. Pour combler cette lacune, une expérience en serre a été mise en place afin d'étudier la réponse des caractéristiques du maïs et du blé, en particulier la productivité de la biomasse et l'absorption de l'azote, ainsi que la réponse des enzymes extracellulaires du sol aux applications foliaires d'une zéolithe naturelle en combinaison avec différents niveaux de fertilisation azotée, c'est-à-dire 100 %, 75 % et 50 % de la dose optimale. L'application foliaire de zéolithe sur des plants de blé et de maïs a entraîné une augmentation de la concentration d'azote dans les racines d'environ 10 %, en particulier au taux de fertilisation azotée le plus faible. Cette réaction s'est accompagnée d'une augmentation du ratio d'absorption de l'azote entre la partie aérienne et la partie souterraine. En outre, l'application de zéolithe a entraîné une réduction significative d'environ 20 % de la biomasse racinaire dans les deux cultures sur l'ensemble du gradient de fertilisation azotée. Ces réponses au niveau des plantes ont été associées à une augmentation significative de l'activité des enzymes dégradant le carbone et l'azote au niveau du sol en réponse aux applications de zéolithe. Nos résultats constituent une preuve de concept convaincante des effets bénéfiques de la zéolithe appliquée par voie foliaire en tant que biostimulant pour les cultures, tout en soulignant le besoin critique de recherches supplémentaires sur le terrain pour valider nos résultats en serre.

HISTORIQUE DE L'ARTICLE

Reçu le 13 mars 2023
Accepté le 30 octobre 2023

MOTS CLÉS

Bêta-glucosidase ;
leucine-amino-
peptidase ; biomasse
racinaire ; *Triticum
aestivum* L. ; *Zea mays* L

CONTACT Luca Bragazza  luca.bragazza@agroscope.admin.ch  Agroscope, Systèmes de culture et nutrition des plantes, Nyon, Suisse.

© 2023 Agroscope. Publié sous licence par Taylor & Francis Group, LLC

Il s'agit d'un article en libre accès distribué selon les termes de la licence Creative Commons Attribution

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui permet l'utilisation, la distribution et la reproduction sans restriction sur n'importe quel support, à condition que l'œuvre originale soit correctement citée. Les conditions de publication de cet article autorisent l'affichage du manuscrit accepté dans un dépôt par le(s) auteur(s) ou avec leur consentement

Introduction

Répondre à la demande d'une population mondiale en expansion rapide et minimiser les conséquences environnementales des pratiques agronomiques constituent des défis importants pour l'agriculture moderne (Clark et Tilman 2017 ; Lynch et al. 2021). Les biostimulants végétaux (PB) ont été identifiés comme des éléments importants dans la promotion d'une agriculture durable (Cataldo et al. 2021). En effet, les PB sont définis comme substances, mélanges ou micro-organismes capables d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments, la tolérance au stress abiotique et/ou les caractéristiques des cultures (Rouphael et Colla 2020 ; Del Buono 2021 ; Du Jardin 2015) et peuvent être classés en six catégories, à savoir, les acides humiques et fulviques, les Hydrolysats de protéines, algues et autres extraits de plantes, chitosane, champignons et bactéries bénéfiques, ainsi que composés inorganiques (Du Jardin 2015 ; Yakhin et al. 2016).

Bien que le mode d'action des différents PB ne soit pas encore entièrement compris (Yakhin et al. 2017), l'application récente de la phénologie végétale combinée à la métabolomique semble prometteuse pour élucider la manière dont les différents PB peuvent promouvoir la croissance des plantes (Nephali et al. 2020 ; Li et al. 2022 ; Zhang et al. 2023). L'action des PB devrait se traduire par des avantages économiques et environnementaux tels qu'un rendement plus élevé des cultures, une meilleure qualité des cultures, un taux de fertilisation réduit et/ou une plus grande tolérance aux stress. Des méta-analyses récentes ont montré que les PB peuvent améliorer le rendement des cultures (Li, van Gerrewey et Geelen 2022) et l'efficacité de l'utilisation des nutriments (Herrmann et al. 2022) en fonction du type de biostimulant, du mode d'application, de l'espèce cultivée et des conditions environnementales.

La catégorie des composés inorganiques des PB comprend des éléments essentiels ou des sels inorganiques tel que, par exemple, les silicates, les phosphites et les carbonates. Les nanomatériaux naturels siliceux tels que les zéolithes peuvent potentiellement être inclus dans cette catégorie de PB inorganiques (Constantinescu-Aruxandei et al. 2020 ; Mondal et al. 2021). Les zéolithes naturelles sont des aluminosilicates nanoporeux, cristallins et hydratés de cations alcalins et alcalino-terreux qui se caractérisent par une déshydratation réversible, un grand volume d'espace libre et une capacité d'échange de cations élevée (Mumpton 1999). Lorsqu'elles sont appliquées comme amendement du sol, des études récentes ont montrées que les zéolithes naturelles peuvent affecter la structure microbienne du sol (Ferretti et al. 2018), réduire les pertes d'azote (Ruser et Schulz 2015 ; Faccini et al. 2018 ; Akbari et al. 2021 ; Roumani et Olfs 2021) et augmenter l'efficacité de l'utilisation des nutriments par les plantes (de Campos Bernardi et al. 2016 ; Mehrab et al. 2016 ; Medoro et al. 2022). Il est intéressant de noter que l'ajout de zéolithe aux sols agricoles a été associé à des changements dans les activités enzymatiques extracellulaires, ce qui suggère que la zéolithe peut également affecter l'activité microbienne et, à terme, le cycle des nutriments (Garau et al. 2007 ; Gondek et al. 2023 ; Khati et al. 2017 ; Tzanakakis et al. 2021). Cependant, les études qui testent les zéolithes naturelles en tant que PB pour la nutrition des plantes par application foliaire sont limitées (par exemple El-Gabieri et Ata Allah 2017 ; Moale et al. 2021 ; Petoumenou 2023 ; Sirbu et al. 2023) et, à notre connaissance, aucune étude n'a encore examiné les effets de la zéolithe sur la nutrition des cultures (mais voir Sedaghat et al. 2022 en tant que stratégie contre la sécheresse chez les plants de blé).

Afin de comprendre le potentiel des zéolithes en tant que biostimulant pour les cultures, une expérience en serre a été réalisée dans laquelle des plants de maïs et de blé de printemps ont été traités avec une zéolithe naturelle par application foliaire en combinaison avec trois niveaux de fertilisation azotée (N), à savoir 100 %, 75 % et 50 % de la dose optimale recommandée. La zéolithe testée comme biostimulant (**FertiRoc®**) est une combinaison de zéolithe naturelle (chabazite) et de carbonate de calcium naturel tendre. Notre étude vise à démontrer le potentiel des zéolithes en tant que biostimulants dans la production végétale en améliorant l'utilisation des nutriments et l'activité enzymatique du sol. Plus précisément, nous voulons répondre aux questions suivantes :

(1) Comment la zéolithe appliquée par voie foliaire affecte-t-elle la biomasse aérienne et souterraine ainsi que l'absorption d'azote correspondante dans les plantes de maïs et de blé ? (2) L'activité du carbone, du phosphore et des enzymes dégradant l'azote dans le sol réagit-elle à l'application foliaire de zéolithe ? L'hypothèse principale de cette étude est que, sous des niveaux réduits de fertilisation N, l'application de zéolithe peut non seulement améliorer la nutrition N des deux cultures, mais aussi stimuler l'activité des enzymes dégradant l'azote dans le sol.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

Une expérience en serre a été menée à la station de recherche de l'Institut suisse de recherche agronomique (Agroscope) à Changins, en Suisse (46.240 N, 06.140 E), d'avril à juin 2021. Les plants de blé de printemps (*Triticum aestivum* L. cv. Diavel) et de maïs (*Zea mays* L. cv. LG31211) ont été cultivés dans deux modules de serre distincts dans les mêmes conditions, c'est-à-dire un régime lumière/obscurité de 14/10 h avec un éclairage d'appoint de 400 W m^{-2} à 22/15 °C et une humidité relative de 50%. Les plants de blé et de maïs ont été cultivés dans des pots en plastique de respectivement 20 cm (diamètre) x 15 cm (hauteur) et 20 cm (diamètre) x 25 cm (hauteur) contenant 3 kg de terre pour le blé et 6 kg de terre pour le maïs. Tous les pots de chaque module de serre ont été placés sur des tables et mélangés au hasard chaque semaine pour éviter tout effet potentiel des gradients microclimatiques.

Cinq et trois graines respectivement de blé et de maïs ont été semées dans chaque pot. Après l'émergence des graines, les plants de maïs ont été réduits à un plant par pot, tandis que cinq plants de blé ont été laissés dans chaque pot. Tous les pots contenaient un sol limoneux (338 g kg^{-1} sable, 425 g kg^{-1} limon et 237 g kg^{-1} argile) qui a été prélevé manuellement dans la couche superficielle (0-15 cm) d'un sol agricole classé comme cambisol calcarique et situé à proximité de la serre. Avant le repotage, le sol a été séché à l'air, broyé, tamisé à travers une maille de 1 cm et mélangé soigneusement. Les propriétés physico-chimiques initiales du sol étaient les suivantes : pH (1:2,5, H_2O) de 7,9, teneur totale en N de 1,21 g kg^{-1} , teneur totale en C organique de 13,3 g kg^{-1} , teneur en P disponible de 0,14 g kg^{-1} , et teneur en K disponible de 0,29 g kg^{-1} . Toutes les plantes ont reçu de l'eau déminéralisée deux ou trois fois par semaine afin de maintenir l'humidité du sol à 60-80% de la capacité du champ pendant toute la période expérimentale. Les deux espèces ont été laissées en croissance pendant neuf semaines. Tous les pots ont reçu un traitement de fertilisation de base composé de P (sous forme de KH_2PO_4) et de K (sous forme de KCl).

Traitements à l'azote et à la zéolithe

Les pots ont été disposés selon un plan répété et complètement randomisé. La fertilisation azotée a été appliquée à trois taux différents (traitements), c'est-à-dire la quantité de 110 et 120 kg N ha^{-1} pour le maïs et le blé, respectivement, conformément aux recommandations officielles pour une fertilisation azotée optimale (Sinaj et Richner 2017), et deux quantités inférieures de 60 kg N ha^{-1} et 90 kg N ha^{-1} pour les deux cultures. L'azote a été appliqué sous forme de nitrate d'ammonium à deux dates pour le maïs, c'est-à-dire aux stades de croissance V4 (présence de quatre feuilles) et V6 (présence de six feuilles), et à trois stades pour le blé, c'est-à-dire à l'échelle de croissance Zadoks Z16 (six feuilles dépliées), Z18 (huit feuilles dépliées) et Z19 (neuf feuilles dépliées) (Zadoks et al. 1974). Dans le cas du maïs, chacune des deux dates de fertilisation a fourni la moitié de la dose optimale totale d'azote. De même, dans le cas de la fertilisation du blé, chacune des trois dates d'ajout d'azote a fourni un tiers de la dose optimale totale d'azote. Les trois traitements de fertilisation N (ci-après N120/N110, N60 et N90 kg ha^{-1}) ont été couplés avec (Z) ou sans (0Z) application foliaire de zéolithe. Ainsi, le plan d'expérience global a donné lieu à six traitements, c'est-à-dire 3 niveaux d'azote et 2 niveaux de zéolithe. Plus précisément, l'expérience sur le maïs comprenait 24 unités expérimentales (chaque pot contenant une plante était une unité expérimentale). Pour chaque traitement N (c'est-à-dire 110, 90 et 60 kg ha^{-1}), les plants de maïs ont reçu deux niveaux de zéolithe foliaire (avec ou sans ajout, voir ci-dessous pour la quantité spécifique) avec quatre répétitions pour chaque traitement. Pour l'expérience sur le blé, chaque unité expérimentale était représentée par un pot contenant cinq plantes. Les niveaux d'azote et de zéolithe ont suivi le même protocole que pour le maïs, ce qui a donné 24 unités expérimentales. Tous les traitements avec la zéolithe foliaire ont été pulvérisés les mêmes jours que la fertilisation N (30, 36 et 42 jours après le semis pour le blé, et 36 et 51 jours après le semis pour le maïs).

Le produit commercial FertiRoc® a été utilisé comme zéolithe naturelle et a été pulvérisé sur les plantes à l'aide d'un pulvérisateur portable pressurisé de 1 L.

Le produit FertiRoc® est une composition de zéolithe naturelle (chabazite) mélangée à une proportion de carbonate de calcium tendre naturel. Pour être efficace, la composition est micronisée et travaillée extrêmement finement selon le savoir-faire de la société productrice Power the Nature SA (Lausanne, Suisse et Mondorf-les-Bains, Luxembourg). Pour le blé, la quantité de zéolithe adéquate a été préparée en fonction de la surface couverte par 12 pots (soit 1,2 m²) en suivant les recommandations du fabricant, à savoir 10 L de FertiRoc® ha⁻¹ dans 600 l d'eau. Cela a donné lieu à l'application d'une solution de 72 ml d'eau contenant 1,2 ml de FertiRoc®. Pour le maïs, la quantité adéquate de zéolithe pour 24 pots a été préparée avec l'équivalent de 15 L de FertiRoc® ha⁻¹ dans 600 L, ce qui a donné une solution de 72 ml d'eau contenant 1,8 ml de FertiRoc®. Les témoins du traitement à la zéolithe (0Z) ont été pulvérisés avec la même quantité d'eau déminéralisée aux mêmes dates d'application foliaire de FertiRoc®.

Échantillonnage et analyses en laboratoire d'échantillons de plantes et de sol

Les plants de blé et de maïs ont été échantillonnés 9 semaines après l'ensemencement afin de récupérer la biomasse aérienne et souterraine (racines). Les plants de blé ont été échantillonnés aux stades de développement « grain pâteux » (stade de croissance 85), c'est-à-dire lorsque les épis étaient déjà émergés et que les pousses, y compris les feuilles étendard, étaient jaunes (Zadoks et al. 1974). D'autre part, les plantes de maïs ont été échantillonnées au stade de la floraison. Pour le blé, les cinq plantes de chaque pot ont été échantillonnées ensemble, puis séparées en racines, biomasse aérienne et biomasse des épis. Les plants de maïs, un par pot, ont été séparés en biomasse aérienne (les glands ont été inclus) et en racines. La biomasse aérienne a été coupée au niveau du sol et les racines ont été délicatement lavées à la main sur un tamis en utilisant de l'eau du robinet pour éliminer les particules de sol. Toutes les parties séparées ont été séchées au four à 60° C pendant 72 heures.

Après séchage, les racines, la biomasse aérienne et les échantillons de biomasse des épis ont été broyés à l'aide d'un broyeur à rotor pour obtenir une poudre fine (<2 mm). La teneur totale en N (%) a été déterminée par combustion sèche de Dumas. L'absorption d'azote dans la biomasse aérienne et souterraine a été calculée comme suit : [concentration de N (%) x poids sec (g de plante⁻¹)]. Lors de la récolte, des échantillons composites de sol composés de trois carottes de sol (2,5 cm de diamètre et 10 cm de profondeur) par pot ont été prélevés et soigneusement mélangés. Des sous-échantillons frais ont été immédiatement congelés à -20° C pour l'analyse des enzymes du sol.

Activité enzymatique extracellulaire du sol

Les activités de cinq enzymes du sol sélectionnées, liées au cycle C, c'est-à-dire la b-glucosidase (BG), b-xylosidase (BX), aux cycles C et N, c'est-à-dire la b-N-acetylglucosaminidase (NAG), au cycle N, c'est-à-dire leucine aminopeptidase (LAP), et au cycle P, c'est-à-dire la phosphatase acide (AP), ont été mesurées à l'aide de substrats fluorogènes synthétiques selon une procédure modifiée par (Marx et al. 2001 ; German et al. 2011). Le substrat fluorogène à base de 4-méthylumbellifénone (MUF) a été utilisé pour déterminer les activités de BG, BX, NAG et AP (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO). Le substrat fluorogène à base de 7- amino-4-méthylcoumarine (MUC) a été utilisé pour déterminer l'activité de la LAP (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO). La fluorescence a été mesurée par un lecteur de microplaques (BioTek, Instruments, US) avec une longueur d'onde d'excitation de 355 nm et une longueur d'onde d'émission de 460 nm. Pour l'étalonnage et les effets d'extinction, un ensemble d'étalons a été préparé avec 200 µL de solution de boue de sol (pour chaque échantillon individuel) avec une gamme de concentrations croissantes d'étalons MUF ou MUC. Les activités enzymatiques ont été calculées à partir des pentes de régression des mesures standard ainsi que des valeurs moyennes de fluorescence des triplicats pour chaque échantillon et elles ont été rapportées en µmol de substrat (MUF ou MUC) g⁻¹ sol sec h⁻¹.

Analyses statistiques

Les analyses statistiques univariées et multivariées ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica v. 13.5.1.17 (TIBCO Software). Le plan expérimental comportait deux facteurs, à savoir la fertilisation azotée (trois niveaux) et le biostimulant zéolithe (deux niveaux). Pour toutes les variables étudiées, une analyse de variance à deux voies (ANOVA) a été utilisée pour tester les effets de la fertilisation azotée, de la zéolithe et de leur interaction. Une interaction significative indique que l'effet de la zéolithe dépend du niveau de fertilisation azotée. Pour chaque niveau de fertilisation N, l'effet de l'application de zéolithe a été testé au moyen d'un test *t de Student*. Enfin, une analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée pour déterminer les corrélations et explorer la variabilité entre les paramètres de la plante et du sol.

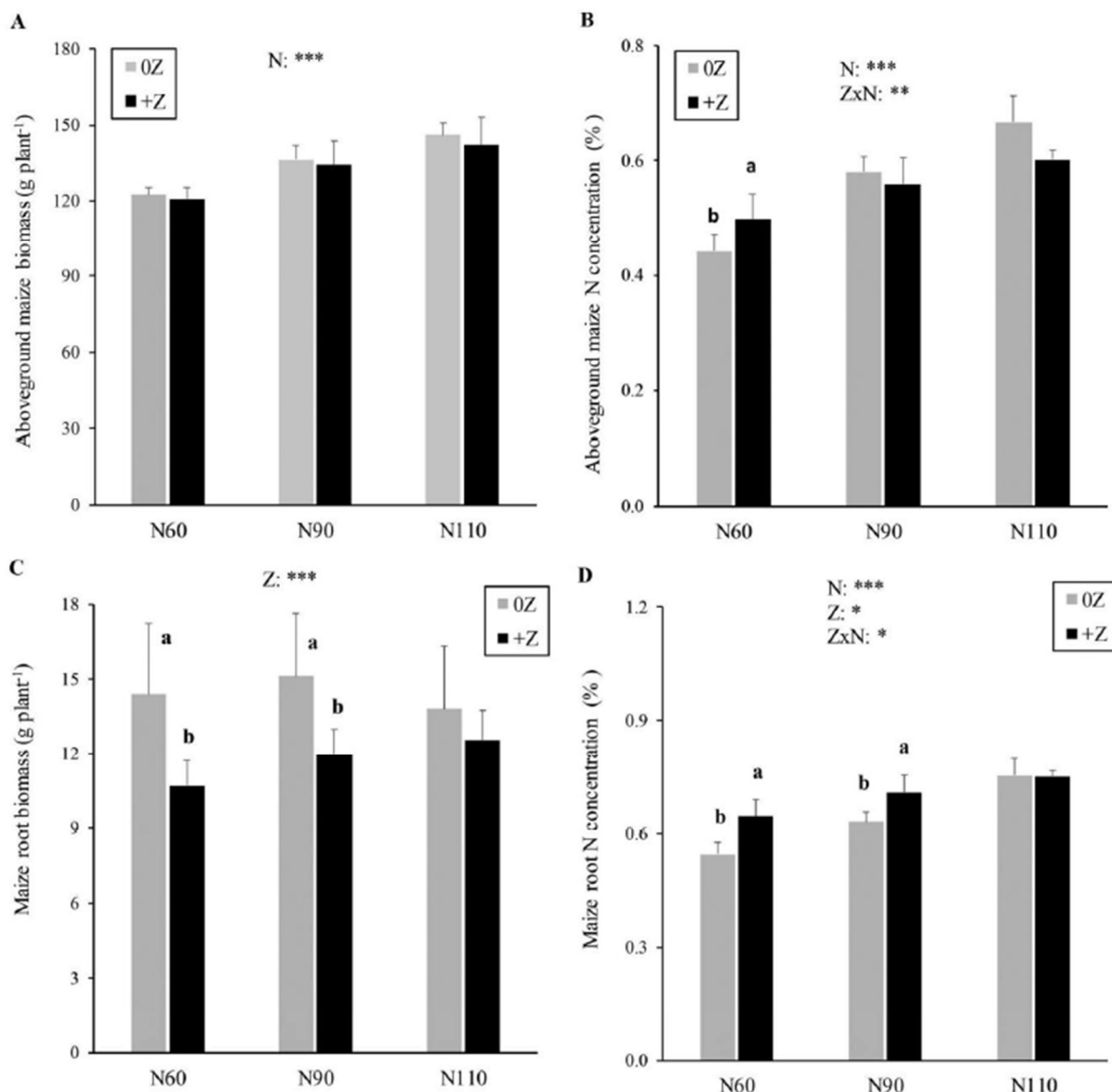


Figure 1. Moyenne (n = 4) de la biomasse aérienne (a), de la concentration en N de la biomasse aérienne (B), de la biomasse souterraine (C) et de la concentration en N de la biomasse souterraine (D) dans les plants de maïs sous différents N (N60, N90 et N110) (kg ha⁻¹) et traitements à la zéolithe (0Z ¼ contrôle, +Z ¼ ajout). Les barres d'erreur représentent l'écart type. Les facteurs significatifs (N et Z) et leur interaction (ZxN) de l'ANOVA bidirectionnelle sont indiqués (p <.10 ; p <.05 ; p <.01) en relation avec le traitement à l'azote et à la zéolithe. Les lettres en exposant indiquent des différences significatives (p < 0,085) entre les traitements à la zéolithe pour le même taux de fertilisation en N sur la base du test t-Student.

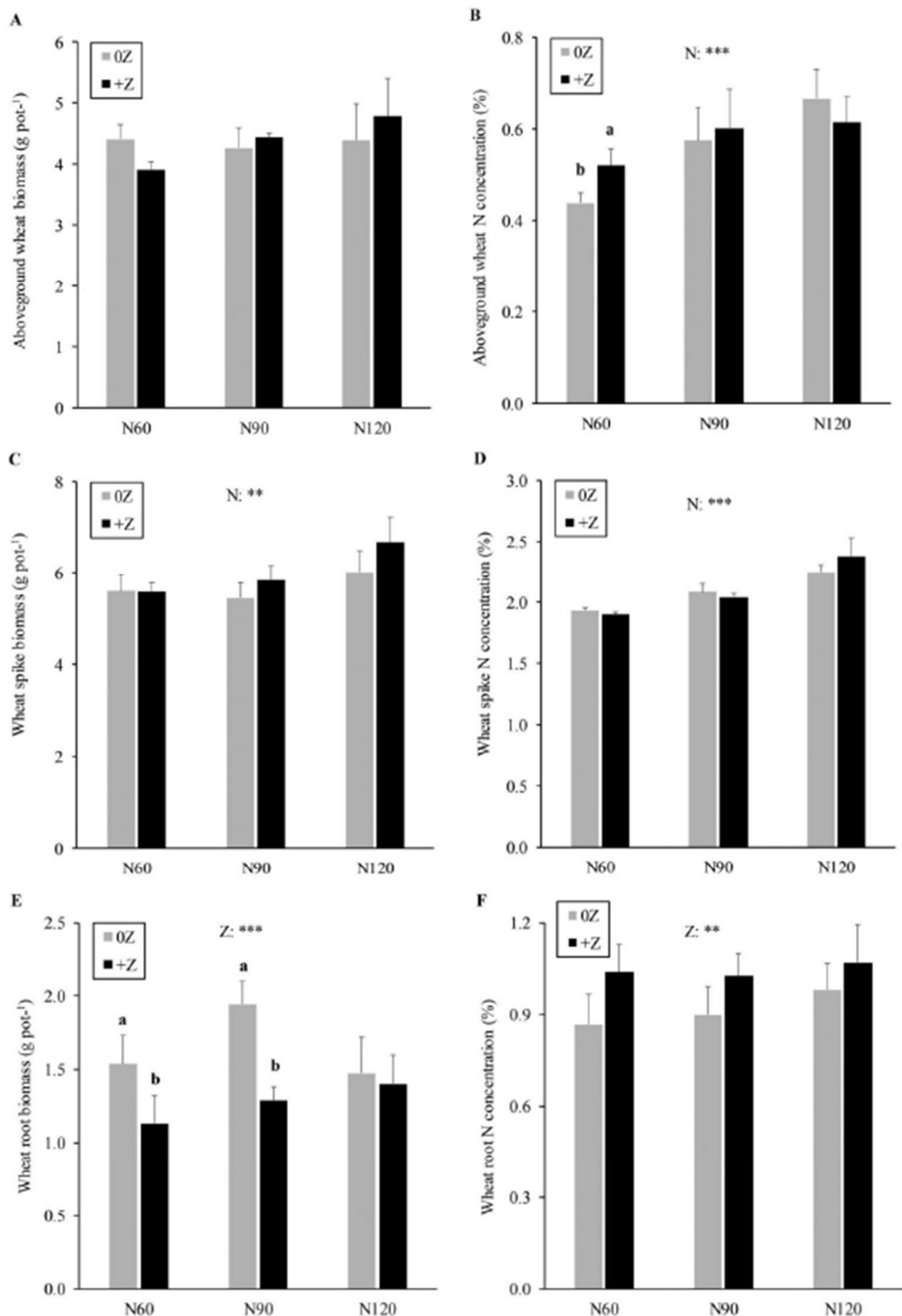


Figure 2. Moyenne (n = 4) biomasse aérienne (A), concentration de N dans la biomasse aérienne (B), biomasse des pointes (C), concentration de N dans la biomasse des pointes (D), biomasse des racines (E) et concentration de N dans la biomasse souterraine (F) dans des plants de blé soumis à différents traitements à l'azote (N60, N90 et N120 kg ha⁻¹) et à la zéolite (0Z ¼ contrôle, pZ ¼ ajout). Les barres d'erreur représentent l'écart type. Les facteurs significatifs (N et Z) et leur interaction (ZxN) de l'ANOVA bidirectionnelle sont indiqués (p < 0,10 ; p < 0,05 ; p < 0,01) en relation avec le traitement à l'azote et à la zéolite. Les lettres en exposant indiquent des différences significatives (p < 0,040) entre les traitements à la zéolite pour le même taux de fertilisation en N sur la base du test t-Student.

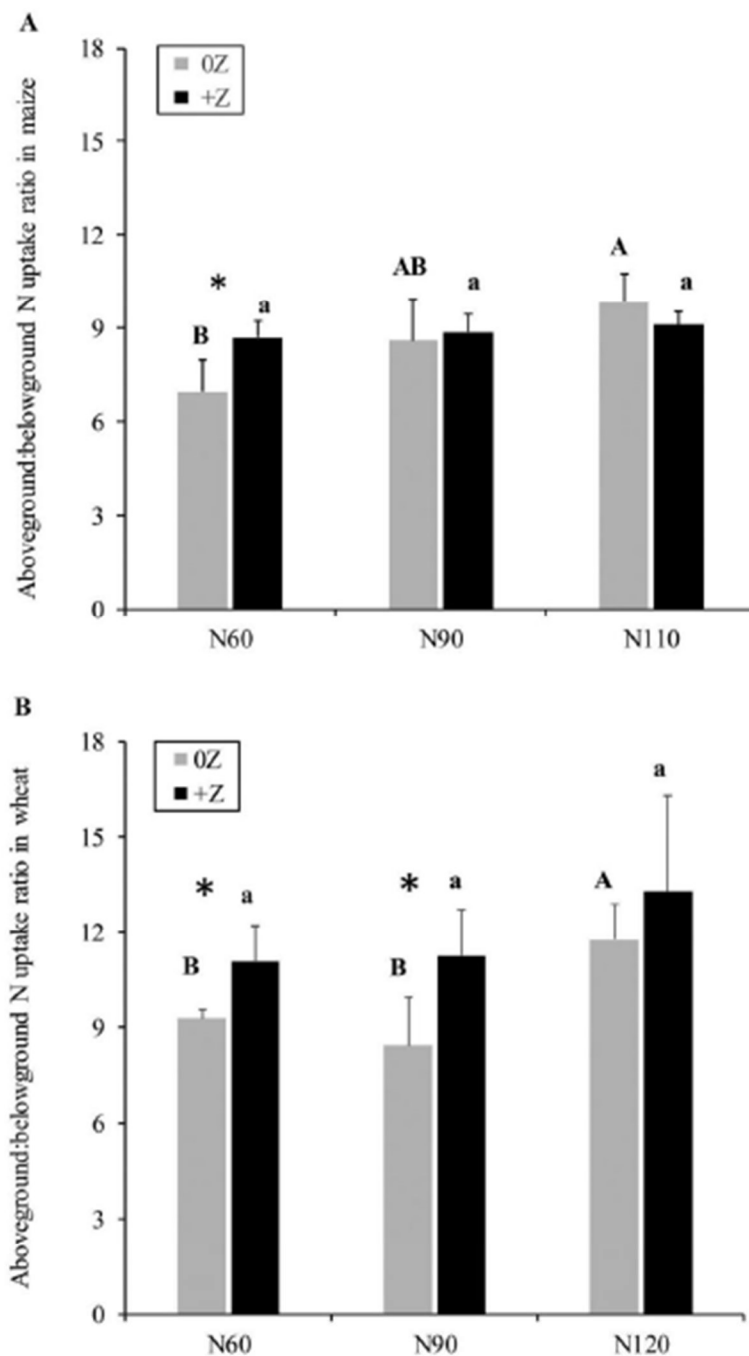


Figure 3. Rapport moyen (n = 4) entre l'absorption aérienne et souterraine de N dans les plants de maïs (A) et dans les plants de blé (B) sous différents N (N60, N90 et N110/120 kg ha⁻¹) et zéolite (0Z ¼ contrôle, pZ ¼ addition). Dans le cas du blé, la biomasse aérienne comprend la biomasse aérienne et la biomasse des épis. Les barres d'erreur représentent l'écart-type. Les lettres en exposant indiquent des différences significatives (p < 0,05) entre les traitements de fertilisation N pour le même traitement à la zéolite (majuscule ¼ 0Z, minuscule ¼ pZ) basé sur une ANOVA unidirectionnelle et un test post-hoc de Fisher LSD. Les astérisques indiquent une différence significative (p < 0,05) entre les traitements à la zéolite pour le même niveau de fertilisation en N sur la base du test t-Student.

Tableau 1. Effet de la fertilisation azotée (N) et de l'ajout de zéolite (Z) sur l'activité moyenne des enzymes ciblant le C, le N et le P dans les sols de maïs et de blé.

Sol	Activité enzymatique (mmol MUF ou MUC g ⁻¹ sol h ⁻¹)	Traitement à la zéolite		analyses statistiques		
		0Z	βZ	Effet Z	Effet N	Interaction ZxN
Maïs	Phosphatase acide (AP) b-	10,7a	6,6b		N.É.	N.É.
	glucosidase (BG) b-	39,4b	73,3a		N.É.	N.É.
	xylosidase (BX)	10,2a	4,4b		N.É.	N.É.
	N-acétylglucosaminidase (NAG)	9,3a	3,9b		N.É.	N.É.
	Leucine-aminopeptidase (LAP)	19,2b	34,3a		N.-	N.É.
Blé	Phosphatase acide (AP) b-	18,9a	9,9b		É.	N.É.
	glucosidase (BG) b-	30,2b	93,7a			
	xylosidase (BX)	6,9b	21,3a		N.-	N.É.
	N-acétylglucosaminidase (NAG)	8,7a	5,5b		É.	N.É.
	Leucine aminopeptidase (LAP)	17,1b	36,8a		N.É.	N.É.

Remarque : Les valeurs sont la moyenne (n = 12) sur trois taux de fertilisation N pour les deux traitements à la zéolite. Le traitement 0Z indique l'absence d'ajout de zéolithe (témoin), tandis que β Z indique l'ajout de zéolithe selon les indications de fabrication. L'analyse statistique, basée sur une NOVA bidirectionnelle, montre l'importance de l'effet de la zéolite et de l'azote ainsi que leur interaction : NS ¼ non significatif (p > 0,10), ¼ p 0,05, ¼ p < 0,01. Pour chaque enzyme, la signification de la comparaison post-doctorale de Fisher LSD entre les traitements à la zéolite est indiquée par différentes petites lettres (p 0,05).

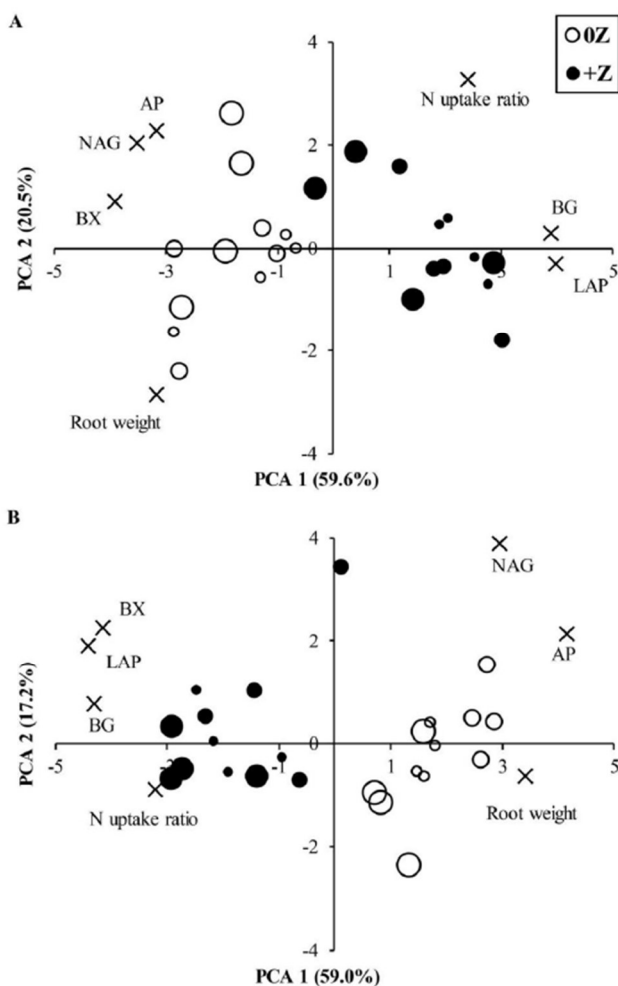


Figure 4. ordination PCA d'échantillons de maïs (A) et de blé (B) sur la base de l'activité enzymatique du sol de la phosphatase acide (AP), de la b-glucosidase (BG), de la b-xylosidase (BX), de la N-acétylglucosaminidase (NAG), et la leucine aminopeptidase (LAP), ainsi que sur la base du rapport d'absorption de l'azote aérien et souterrain et du poids des racines sous addition de zéolite (βZ) et sans addition de zéolite (0Z). Les trois taux de fertilisation N sont représentés par la taille croissante des cercles (120/110 kg N ha⁻¹ ¼ plus grande taille, 60 kg N ha⁻¹ ¼ taille la plus basse).

Résultats

Effet de la fertilisation azotée et de l'ajout de zéolithe sur la biomasse aérienne

⁺ Dans les plantes de maïs, sur la base d'une ANOVA à deux voies, un effet positif de la fertilisation N sur la biomasse aérienne et la concentration N correspondante a été observé (Figure 1A, B). En revanche, l'ajout de zéolithe n'a pas eu d'effet sur la biomasse aérienne ni sur la concentration d'azote correspondante, à la seule exception du traitement de fertilisation azotée le plus faible (N60) où l'application de zéolithe a augmenté de manière significative la concentration d'azote dans la biomasse aérienne (c. 13%) par rapport au traitement sans zéolithe (Figure 1B).

Chez les plants de blé, ni la fertilisation azotée ni l'application de zéolithe n'ont eu d'impact significatif sur la biomasse aérienne (figure 2A). En revanche, la fertilisation azotée a eu un effet positif sur la teneur en N dans la biomasse aérienne (figure 2B). L'application de zéolithe n'a pas affecté la concentration d'azote dans la biomasse aérienne du blé, mais elle a conduit à une augmentation significative (c. 19%) de la concentration d'azote au niveau de fertilisation le plus bas par rapport au traitement sans zéolithe (Figure 2B).

En ce qui concerne la biomasse des épis et la concentration d'azote dans les épis (figure 2C, D), la fertilisation azotée a eu un effet significatif, mais pas l'application de zéolithe. Néanmoins, il y a eu une tendance vers des valeurs moyennes plus élevées de la biomasse des épis avec l'ajout de zéolithe le long du gradient d'azote (Figure 2C).

Effet de la fertilisation azotée et de l'ajout de zéolithe sur la biomasse souterraine

En ce qui concerne la biomasse souterraine des deux cultures, la fertilisation N n'a pas eu d'impact significatif sur la productivité des racines. Cependant, la biomasse racinaire a eu tendance à diminuer à des taux de fertilisation N plus élevés, en particulier pour le maïs (Figures 1C et 2E). Inversement, l'ajout de zéolithe a entraîné une diminution significative de la biomasse racinaire pour les deux espèces cultivées (figures 1C et 2E) et une augmentation de la concentration d'azote dans les racines (figures 1D et 2F) dans tous les traitements de fertilisation azotée.

Effet de l'ajout de zéolithe sur l'absorption de l'azote

Le ratio d'absorption de l'azote en surface par rapport à l'azote souterrain a été positivement affecté par l'ajout de zéolithe pour les deux espèces cultivées, en particulier à des niveaux de fertilisation en azote plus faibles (Figure 3). En effet, sans application de zéolithe, les plantes recevant une fertilisation N plus élevée se caractérisaient par un rapport d'absorption N en surface/sous-sol significativement plus élevé. Cependant, avec l'application de zéolithe, aucune différence significative n'a été observée dans le rapport d'absorption de N entre les trois niveaux de fertilisation N (Figure 3). Notamment aux niveaux de fertilisation N les plus bas (N60 pour le maïs et N60 et N90 pour le blé), l'application de zéolithe a entraîné une augmentation significative du ratio d'absorption N en surface par rapport au contrôle correspondant (Figure 3).

Effet de l'ajout de zéolithe sur l'activité enzymatique du sol

L'application foliaire de zéolithe a été associée à un changement significatif de l'activité des enzymes du sol dans les sols de maïs et de blé. Plus précisément, l'activité de la b-glucosidase (BG) et de la leucine-aminopeptidase (LAP) a plus que doublé, tandis que l'activité de la phosphatase acide (AP) et de la N-acétylglucosaminidase (NAG) a diminué avec l'application de la zéolithe (tableau 1). En outre, l'activité de la b-xylosidase (BX) a augmenté dans le sol de blé, mais a diminué dans le sol de maïs après l'application de la zéolithe (tableau 1).

Discussion

L'augmentation de la biomasse aérienne observée en réponse à la fertilisation azotée est en accord avec les études précédentes qui rapportent un effet positif de l'augmentation de la disponibilité de l'azote sur la productivité du maïs et du blé (Miao et al. 2006 ; Morris et al. 2018 ; Struck et al. 2019 ; Ordonez et al. 2020).

Il est intéressant de noter que l'application de zéolithe dans le traitement de fertilisation N le plus faible a entraîné une concentration plus élevée de N dans la biomasse aérienne pour les deux espèces cultivées, ce qui suggère que la zéolithe peut, directement ou indirectement, améliorer l'absorption de N lorsque la disponibilité de N est plus faible.

En ce qui concerne la productivité souterraine, des études antérieures ont démontré que les plantes ont tendance à allouer davantage de matière sèche à la biomasse souterraine afin d'acquérir plus de nutriments lorsqu'elles sont confrontées à une plus faible disponibilité en azote (Chen et al. 2015 ; Liu et al. 2017 ; Duncan et al. 2018 ; Ordonez et al. 2020 ; Kubar et al. 2022). Cela explique l'augmentation observée de la biomasse racinaire en réponse à la diminution de la fertilisation en N, une réponse particulièrement prononcée chez le maïs.

Dans le même temps, la diminution observée de la biomasse racinaire avec l'application de zéolithe peut en effet refléter une augmentation de la disponibilité de l'azote, ce qui se traduit par un investissement moindre dans la croissance des racines (figures 1D et 2F).

Malgré la diminution de la biomasse racinaire, les données indiquent que l'application de zéolithe a été associée à une amélioration de l'efficacité de l'absorption de l'azote, en particulier dans le cas d'une fertilisation azotée plus faible où une concentration d'azote plus élevée dans la biomasse aérienne a été détectée avec l'application de zéolithe (figures 1B et 2B).

L'application foliaire de zéolithe a conduit à une stabilisation du taux d'absorption de l'azote à tous les niveaux de fertilisation, en particulier à de faibles taux de fertilisation (figure 3). Cet effet a été observé dans les deux cultures étudiées et n'était pas visible en l'absence d'application de zéolithe. Les mécanismes directs et indirects de la zéolithe qui favorisent une meilleure absorption de l'azote à des niveaux de fertilisation plus faibles ne sont pas encore clairs et d'autres études sont nécessaires. Nous pouvons supposer que la zéolithe peut, soit directement affecter le métabolisme de l'azote de la plante (Li et al. 2022 ; Savarese et al. 2022), soit indirectement par le biais des interactions entre la plante et les microbes du sol (Pantigoso et al. 2022 ; Costa et al. 2023). Pour notre étude, nous avons émis l'hypothèse qu'un rôle dans l'amélioration de l'absorption de l'azote est également joué par un changement dans l'activité enzymatique du sol avec l'application de la zéolithe (tableau 1). Plus précisément, des activités plus élevées de la β -glucosidase (BG) et de la leucine-aminopeptidase (LAP) ont été associées à un rapport N aérien/sous-sol plus élevé et à une biomasse racinaire plus faible dans les deux cultures (figure 4). L'augmentation de l'activité de la LAP indique une augmentation de la dégradation des acides aminés et, par conséquent, plus d'azote disponible pour les cultures (Siwik-Ziomek et Szczepanek 2019 ; Greenfield et al. 2021). Parallèlement, l'augmentation de l'activité BG peut refléter un changement dans la qualité et la quantité de l'exsudat racinaire afin de promouvoir l'activité microbienne du sol (Sanaullah et al. 2016) et d'accélérer le cycle de l'azote dans le sol (Henneron et al. 2020). La diminution observée de l'activité de la NAG est cohérente avec les résultats précédents sur la réponse de cette enzyme à l'augmentation de la disponibilité de l'azote (Olander et Vitousek 2000) et aux changements dans la composition de l'exsudat racinaire (Hao et al. 2022). La diminution de l'activité de l'AP peut être attribuée à une mobilisation accrue du phosphore inorganique résultant de la libération d'acides organiques par les racines des plantes (Zhang et al. 2019).

Dans l'ensemble, nous émettons l'hypothèse que les changements observés dans les activités enzymatiques du sol induits par l'application de FertiRoc® peuvent refléter une réponse fonctionnelle du microbiome du sol aux changements dans les exsudats des racines des cultures (Sieradzki et al. 2023). Ce lien entre l'activité enzymatique du sol et la composition du microbiome du sol a déjà été signalé en réponse à l'ajout d'autres types de PB (Khatai et al. 2017 ; Barone et al. 2019 ; Mattarozzi et al. 2020 ; Trivedi et al. 2021).

Conclusion

En conclusion, cette étude démontre que l'application foliaire du FertiRoc® a des effets significatifs au niveau de la plante et du sol.

Pour le maïs et le blé, l'ajout de zéolithe a réduit la biomasse des racines mais a augmenté la concentration d'azote dans les racines, en particulier à des taux d'engrais azotés plus faibles.

Fait remarquable, l'ajout de zéolithe a permis de maintenir un rapport constant entre l'absorption de l'azote par les parties aériennes et souterraines, même en cas d'apport réduit d'azote.

Au niveau du sol, l'ajout de zéolithe a augmenté l'activité des enzymes b-glucosidase et leucine-aminopeptidase, conduisant potentiellement à une disponibilité accrue de l'azote.

Cette recherche fournit une preuve de concept des avantages potentiels de l'application foliaire de zéolithe en tant que biostimulant pour les cultures. Toutefois, la complexité des effets mérite une étude plus approfondie pour élucider complètement les mécanismes sous-jacents. Ceci est particulièrement important si l'application foliaire de zéolithe peut être combinée avec des stratégies visant à réduire les niveaux de fertilisation en N tout en maintenant la qualité et la quantité du rendement des cultures.

Remerciements

Nous remercions Yves Grosjean et Said Elfouki pour leur soutien technique lors de l'expérience en serre.

Déclaration de divulgation

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts. Le financeur "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.

Financement

Cette recherche a été partiellement financée par "Power the Nature". En outre, dans le cadre du ArbeitProgram22-25, cette étude a également été partiellement financée par Agroscope.

ORCID

Luca Bragazza  <http://orcid.org/0000-0001-8583-284X>

Déclaration de disponibilité des données

Les données présentées dans cette étude sont disponibles sur demande auprès de l'auteur correspondant.

Références

- Akbari, H., S. A. M. Modarres-Sanavy, et A. Heidarzadeh. 2021. Fertilizer systems deployment and zeolite application on nutrients status and nitrogen use efficiency. *Journal of Plant Nutrition* 44 (2):196-212. doi : [10.1080/01904167.2020.1806299](https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1806299).
- Barone, V., I. Puglisi, F. Fragalza, P. Stevanato et A. Baglieri. 2019. Effet des cellules vivantes de microalgues ou de leur extracts on soil enzyme activities. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65 (5):712-26. doi : [10.1080/03650340.2018.1521513](https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1521513).
- Cataldo, E., L. Salvi, F. Paoli, M. Fucile, G. Masciandaro, D. Manzi, C. M. Masini et G. B. Mattii. 2021. Application des zéolithes dans l'agriculture et autres utilisations potentielles : A review. *Agronomy* 11 (8):1547. doi : [10.3390/agronomy11081547](https://doi.org/10.3390/agronomy11081547).
- Chen, Y., J. Zhang, Q. Li, X. He, X. Su, F. Chen, L. Yuan et G. Mi. 2015. Effects of nitrogen application on La sénescence des racines après l'ensilage et le rendement du maïs. *Agronomy Journal* 107 (3):835-42. doi : [10.2134/agronj14.0509](https://doi.org/10.2134/agronj14.0509).
- Clark, M., et D. Tilman. 2017. Analyse comparative des impacts environnementaux des systèmes de production agricole, l'efficacité des intrants agricoles et le choix des aliments. *Environmental Research Letters* 12 (6):064016. doi : [10.1088/1748-9326/aa6cd5](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd5).
- Constantinescu-Aruxandei, D., C. Lupu, et F. Oancea. 2020. Les nanomatériaux naturels siliceux comme biorationnels - Les produits de protection des plantes et de renforcement de la santé des plantes. *Agronomy* 10 (11):1791. doi : [10.3390/agronomy10111791](https://doi.org/10.3390/agronomy10111791).
- Costa, O. Y. A., A. Pijl, J. Houbraeken, W. van Lith et E. E. Kuramae. 2023. Soil substrate source drives the microbes involved in the degradation of gelatin used as a biostimulant. *Applied Soil Ecology* 189:104906. doi : [10.1016/j.apsoil.2023.104906](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104906).
- de Campos Bernardi, A. C., J. C. Polidoro, M. B. de Melo Monte, E. I. Pereira, C. R. de Oliveira, et K. Ramesh. 2016. Améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments en utilisant des minéraux zéolithiques - une revue. *Advances in Chemical Engineering and Science* 06 (04):295-04. doi : [10.4236/aces.2016.64030](https://doi.org/10.4236/aces.2016.64030).
- Del Buono, D. 2021. Les biostimulants peuvent-ils être utilisés pour atténuer l'effet du changement climatique anthropique sur l'agriculture ? Il est temps d'y répondre. *The Science of the Total Environment* 751:141763. doi : [10.1016/j.scitotenv.2020.141763](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141763).
- Du Jardin, P. 2015. Les biostimulants végétaux : Définition, concept, principales catégories et réglementation. *Scientia Horticulturae* 196:3-14. doi : [10.1016/j.scienta.2015.09.021](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021).
- Duncan, E. G., C. A. O'Sullivan, M. M. Roper, J. Palta, K. Whisson, et M. B. Peoples. 2018. Le rendement et l'efficacité de l'utilisation de l'azote du blé augmentent avec la longueur des racines et la biomasse en raison des interactions entre l'azote, le phosphore et le potassium. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 181 (3):364-73. doi : [10.1002/jpln.201700376](https://doi.org/10.1002/jpln.201700376).
- El-Gabieri, A. E., et Y. F. A. Ata Allah. 2017. Effet de l'application foliaire de bentonite sur la croissance et le rendement des plantes. Productivité du coton égyptien. *Journal of Plant Production* 8 (10):1029-35. doi : [10.21608/jpp.2017.41081](https://doi.org/10.21608/jpp.2017.41081).
- Faccini, B., D. Di Giuseppe, G. Ferretti, M. Coltorti, N. Colombani, et M. Mastrociccio. 2018. Natural and NH⁻⁴⁺ enriched zeolite amendment effects on nitrate leaching from a reclaimed agricultural soil (Ferrara Province, Italy). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 110 (2):327-41. doi : [10.1007/s10705-017-9904-4](https://doi.org/10.1007/s10705-017-9904-4).
- Ferretti, G., K. M. Keiblinger, D. Di Giuseppe, B. Faccini, N. Colombani, S. Zechmeister-Boltenstern, M. Coltorti, et N. Mastrociccio. 2018. Short-term response of soil microbial biomass to different chabazite zeolite amendments. *Pedosphere* 28 (2):277-87. doi : [10.1016/S1002-0160\(18\)60016-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60016-5).
- Garau, G., P. Castaldi, L. Santona, P. Deiana et P. Melis. 2007. Influence de la boue rouge, de la zéolite et de la chaux sur les polluants lourds. immobilisation des métaux, populations microbiennes hétérotrophes cultivables et activités enzymatiques dans un sol contaminé. *Geoderma* 142 (1-2):47-57. doi : [10.1016/j.geoderma.2007.07.011](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.07.011).
- German, D. P., M. N. Weintraub, A. S. Grandy, C. L. Lauber, Z. L. Rinkes, et S. D. Allison. 2011. Optimisation des méthodes enzymatiques hydrolytiques et oxydatives pour les études d'écosystèmes. *Soil Biology and Biochemistry* 43 (7):1387-97. doi : [10.1016/j.soilbio.2011.03.017](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.017).
- Gondek, K., M. Mierzwa-Hersztek et R. Jarosz. 2023. Effect of willow biochar and fly ash-derived zeolite in immobilizing heavy metals and promoting enzymatic activity in a contaminated sandy soil. *Catena* 232:107429. doi : [10.1016/j.catena.2023.107429](https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107429).
- Greenfield, L. M., B. S. Razavi, N. Bilyera, X. Zhang et D. L. Jones. 2021. Les poils racinaires et l'ajout de protéines au sol promouvoir l'activité de la leucine aminopeptidase de *Hordeum vulgare* L. *Rhizosphere* 18:100329. doi : [10.1016/j.rhisph.2021.100329](https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100329).
- Hao, C., J. A. J. Dungait, X. Wei, T. Ge, Y. Kuzyakov, Z. Cui, J. Tian et F. Zhang. 2022. Maize root exudate



- modifie la communauté bactérienne de la rhizosphère pour contrôler les points chauds de l'activité des hydrolases en réponse à l'apport d'azote sur le site. *Soil Biology and Biochemistry* 170:108717. doi : [10.1016/j.soilbio.2022.108717](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108717).
- Henneron, L., P. Kardol, D. A. Wardle, C. Cros et S. Fontaine. 2020. Contrôle rhizosphérique de l'azote du sol le cyclisme : A key component of plant economic strategies. *New Phytologist* 228 (4):1269-82. doi : [10.1111/nph.16760](https://doi.org/10.1111/nph.16760).
- Herrmann, M. N., Y. Wang, J. Hartung, T. Hartmann, W. Zhang, P. M. Nkebiwe, X. Chen, T. Müller et H. Yang. 2022. Méta-analyse d'un réseau mondial sur la promotion de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures par les bioeffecteurs. *Frontiers in Plant Science* 13:816438. doi : [10.3389/fpls.2022.816438](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.816438).
- Khatri, P., A. Sharma, S. Gangola, R. Kumar, P. Bhatt et G. Kumar. 2017. Impact des nanocomposés utilisables en agriculture sur l'activité microbienne du sol : An Indicator of soil health. *CLEAN - Soil, Air, Water* 45 (5):1600458. doi : [10.1002/clean.201600458](https://doi.org/10.1002/clean.201600458).
- Kubar, M. S., K. S. Alshallash, M. A. Asghar, M. Feng, A. Raza, C. Wang, K. Saleem, A. Ullah, W. Yang, K. A. Kubar, et al. 2022. Amélioration de la photosynthèse, de l'efficacité de l'utilisation de l'azote et du rendement du blé d'hiver par l'optimisation de la fertilisation azotée sur le site. *Life (Bâle, Suisse)* 12 (10):1478. doi : [10.3390/life12101478](https://doi.org/10.3390/life12101478).
- Li, B., T. Guo et W. Zhou. 2022. Trehalose outperforms chitosan, humic acid and gamma-aminobutyric acid in promoting the growth of field maize. *Frontiers in Plant Science* 13:889615. doi : [10.3389/fpls.2022.889615](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.889615).
- Li, B. Y., D. L. Song, T. F. Guo, X. P. Xu, C. Ai et W. Zhou. 2022. Combiné physiologique et métabolomique révèle les effets de différents biostimulants sur la production et la reproduction du maïs. *Frontiers in Plant Science* 13:1062603. doi : [10.3389/fpls.2022.1062603](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1062603).
- Li, J., T. van Gerrewey et D. Geelen. 2022. Une méta-analyse de l'efficacité du rendement des biostimulants dans les essais sur le terrain. *Frontiers in Plant Science* 13:836702. doi : [10.3389/fpls.2022.836702](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.836702).
- Liu, Z., K. Zhu, S. Dong, P. Liu, B. Zhao et J. Zhang. 2017. Effets de la gestion intégrée des pratiques agronomiques sur la croissance et le développement des racines du maïs d'été. *European Journal of Agronomy* 84:140-51. doi : [10.1016/j.eja.2016.12.006](https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.12.006).
- Lynch, J., M. Cain, D. Frame, et R. Pierrehumbert. 2021. La contribution de l'agriculture au changement climatique et son rôle dans la lutte contre le changement climatique. L'atténuation des émissions de CO₂ est distincte des secteurs émettant principalement du CO₂ d'origine fossile. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4 : 518093. doi : [10.3389/fsufs.2020.518039](https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.518039).
- Marx, M. C., M. Wood et S. C. Jarvis. 2001. Un essai fluorimétrique en microplaque pour l'étude de la diversité enzymatique dans le sols. *Soil Biology and Biochemistry* 33 (12-13):1633-40. doi : [10.1016/S0038-0717\(01\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00079-7).
- Mattarozzi, M., J. Di Zinno, B. Montanini, M. Manfredi, E. Marengo, F. Fornasier, A. Ferrarini, M. Careri et G. Visioli. 2020. Les biostimulants appliqués aux semences de maïs modulent l'activité enzymatique et le métaprotéome de la rhizosphère. *Applied Soil Ecology* 148:103480. doi : [10.1016/j.apsoil.2019.103480](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103480).
- Medoro, V., G. Ferretti, G. Galamini, A. Rotondi, L. Morrone, B. Faccini et M. Coltorti. 2022. Réduction de l'azote fertilization in olive cultivation by the use of natural chabazite-zeolite as soil improver. *Land* 11 (9):1471. doi : [10.3390/land11091471](https://doi.org/10.3390/land11091471).
- Mehrab, N., M. Chorom, et S. Hojati. 2016. Effet de la zéolithe brute et de la zéolithe enrichie en NH₄⁺ sur l'absorption de l'azote par les plantes. blé et lessivage de l'azote dans des sols de textures différentes. *Communications en science du sol et analyse des plantes* 47 (10):1306-16. doi : [10.1080/00103624.2016.1166377](https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1166377).
- Miao, Y., D. J. Mulla, P. C. Robert, et J. A. Hernandez. 2006. Within-field variation in corn yield and grain quality responses to nitrogen fertilization and hybrid selection. *Agronomy Journal* 98 (1):129-40. doi : [10.2134/agnonj2005.0120](https://doi.org/10.2134/agnonj2005.0120).
- Moale, C., M. Ghiurea, C. G. Sârbu, R. Somoghi, T. M. Cioroianu, V. A. Faraon, C. Lupu, B. Tricã, D. Constantinescu-Aruxandei et F. Oancea. 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 (Basel, Switzerland)* 10 (11):2395. doi : [10.3390/plants10112395](https://doi.org/10.3390/plants10112395).
- Mondal, M., B. Biswas, S. Garai, S. Sarkar, H. Banerjee, K. Brahmachari, P. K. Bandyopadhyay, S. Maitra, M. Brestic, M. Skalicky, et al. 2021. Les zéolithes améliorent la santé des sols, la productivité des cultures et la sécurité environnementale. *Agronomy* 11 (3):448. doi : [10.3390/agronomy11030448](https://doi.org/10.3390/agronomy11030448).
- Morris, T. F., T. S. Murrell, D. B. Beegle, J. J. Camberato, R. B. Ferguson, J. Grove, Q. Ketterings, P. M. Kyveryga, C. A. M. Laboski, J. M. McGrath, et al. 2018. Forces et limites des recommandations de taux d'azote pour le maïs et opportunités d'amélioration. *Agronomy Journal* 110 (1):1-37. doi : [10.2134/agnonj2017.02.0112](https://doi.org/10.2134/agnonj2017.02.0112).
- Mumpton, F. A. 1999. *La roca magica* : Uses of natural zeolites in agriculture and industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96 (7):3463-70. doi : [10.1073/pnas.96.7.3463](https://doi.org/10.1073/pnas.96.7.3463).
- Nephali, L., L. A. Piater, I. A. Dubery, V. Patterson, J. Huyser, K. Burgess et F. Tugizimana. 2020. Biostimulants pour la croissance des plantes et l'atténuation des stress abiotiques : A metabolomics perspective. *Metabolites* 10



(12):505. doi : [10.3390/metabo10120505](https://doi.org/10.3390/metabo10120505).

- Olander, L. P., et PM. Vitousek. 2000. Regulation of soil phosphatase and chitinase activity by N and P availability. *Biogeochemistry* 49 (2):175-91. doi : [10.1023/A:1006316117817](https://doi.org/10.1023/A:1006316117817).
- Ordonez, R. A., S. V. Archontoulis, R. Martinez-Feria, J. L. Hatfield, E. E. Wright, et M. J. Castellano. 2020. Root to shoot and carbon to nitrogen ratios of maize and soybean crops in the US Midwest. *European Journal of Agronomy* 120:126130. doi : [10.1016/j.eja.2020.126130](https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126130).
- Pantigoso, H. A., D. Newberger et J. M. Vivanco. 2022. Le microbiome de la rhizosphère : Plant-microbial interactions for resource acquisition. *Journal of Applied Microbiology* 133 (5):2864-76. doi : [10.1111/jam.15686](https://doi.org/10.1111/jam.15686).
- 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 (Bâle, Suisse)* 12 (7):1444. doi : [10.3390/plants12071444](https://doi.org/10.3390/plants12071444).
- Roumani, A., et H. W. Olf. 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* 44:1-10. doi : [10.1080/01904167.2021.1899217](https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1899217).
- Rouphael, Y., et G. Colla. 2020. Vers une agriculture durable grâce aux biostimulants végétaux : From experimental data to practical applications. *Agronomy* 10 (10):1461. doi : [10.3390/agronomy10101461](https://doi.org/10.3390/agronomy10101461).
- Ruser, R., et R. Schulz. 2015. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils - a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178 (2):171-88. doi : [10.1002/jpln.201400251](https://doi.org/10.1002/jpln.201400251).
- Sanaullah, M., B. S. Razavi, E. Blagodatskaya, et Y. Kuzyakov. 2016. Spatial distribution and catalytic mechanisms of b-glucosidase activity at the root-soil interface (Distribution spatiale et mécanismes catalytiques de l'activité de la b-glucosidase à l'interface racine-sol). *Biology and Fertility of Soils* 52 (4):505-14. doi : [10.1007/s00374-016-1094-8](https://doi.org/10.1007/s00374-016-1094-8).
- Savarese, C., V. Cozzolino, M. Verrillo, G. Vinci, A. De Martino, A. Scopa et A. Piccolo. 2022. La combinaison de biostimulants humiques avec un inoculum microbien améliore la productivité de la laitue, l'absorption des nutriments et le métabolisme secondaire primaire et. *Plant and Soil* 481 (1-2):285-314. doi : [10.1007/s11104-022-05634-8](https://doi.org/10.1007/s11104-022-05634-8).
- Sedaghat, M., S. Hazrati et M. Omrani. 2022. Use of zeolite and salicylic acid as an adaptation strategy against drought in wheat plants. *South African Journal of Botany* 146:111-7. doi : [10.1016/j.sajb.2021.10.001](https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.10.001).
- Sieradzki, E. T., E. E. Nuccio, J. Pett-Ridge et M. K. Firestone. 2023. Expression of macromolecular organic nitrogen degrading enzymes identifies potential mediators of soil organic N availability to an annual grass. *The ISME Journal* 17 (7):967-75. doi : [10.1038/s41396-023-01402-3](https://doi.org/10.1038/s41396-023-01402-3).
- Sinaj, S., et W. Richner. 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017). *Recherche Agronomique Suisse* 8:1-276.
- Siwik-Ziomek, A., et M. Szczepanek. 2019. Soil extracellular enzyme activities and uptake of N by oilseed rape depending on fertilization and seaweed biostimulant application. *Agronomy* 9 (9):480. doi : [10.3390/agronomy9090480](https://doi.org/10.3390/agronomy9090480).
- Struck, I. J., T. Reinsch, A. Herrmann, C. Kluß, R. Loges et F. Taube. 2019. Potentiel de rendement et dynamique de l'azote du maïs d'ensilage en semis direct (*Zea mays* L.) dans des conditions climatiques maritimes. *European Journal of Agronomy* 107 : 30-42. doi : [10.1016/j.eja.2019.04.009](https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.04.009).
- Tzanakakis, V. A., N. Monokrousos et T. Chatzistathis. 2021. Effects of clinoptilolite zeolite and vermiculite on nitrification and nitrogen and phosphorus acquiring enzymes in a nitrogen applied agricultural soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21 (4):2791-802. doi : [10.1007/s42729-021-00566-1](https://doi.org/10.1007/s42729-021-00566-1).
- Trivedi, K., R. Kumar, K. G. Vijay Anand, G. Bhojani, D. Kubavat et A. Ghosh. 2021. Structural and functional changes in soil bacterial communities by drifting spray application of a commercial red seaweed extract as revealed by metagenomics. *Archives of Microbiology* 204 (1):72. doi : [10.1007/s00203-021-02644-5](https://doi.org/10.1007/s00203-021-02644-5).
- Yakhin, O., A. A. Lubyantsev, I. Yakhin, et P. H. Brown. 2017. Les biostimulants dans la science des plantes : A global perspective. *Frontiers in Plant Science* 7:2049. doi : [10.3389/fpls.2016.02049](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049).
- Zadoks, J. C., T. T. Chang, et C. F. Konzak. 1974. Un code décimal pour les stades de croissance des céréales. *Weed Research* 14 (6):415-21. doi : [10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x).
- Zhang, L. L., G. Freschi, Y. Rouphael, S. De Pascale et L. Lucini. 2023. The differential modulation of secondary metabolism induced by a protein hydrolysate and a seaweed extract in tomato plants under salinity. *Frontiers in Plant Science* 13:1072782. doi : [10.3389/fpls.2022.1072782](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1072782).
- Zhang, X., M. A. Dippold, Y. Kuzyakov, et B. S. Razavi. 2019. Le schéma spatial des activités enzymatiques dépend de la composition de l'exsudat racinaire. *Soil Biology and Biochemistry* 133:83-93. doi : [10.1016/j.soilbio.2019.02.010](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.02.010).