European Journal of Agronomy 154 (2024) 127100

Sommaire disponible sur ScienceDirect

European Journal of Agronomy

Page d'accueil de la revue : www.elsevier.com/locate/eja

L'application foliaire de zéolites naturelles affecte la croissance et la productivité des tomates de transformation

Giulia Conversa *, Salvatore Pacifico, Paolo La Rotonda, Corrado Lazzizera, Anna Bonasia, Antonio Elia

Département d'agriculture, d'alimentation, de ressources naturelles et d'ingénierie (DAFNE), Université de Foggia, 71100 Foggia, Italie

INFORMATIONS SUR L'ARTICLE

Mots-clés :
Clinoptinolite Film de particules Production de biomasse
Nutriments
Silicium
Stress thermique

RÉSUMÉ

Il a été démontré que l'application foliaire de zéolites avait un effet positif sur la physiologie des plantes, ce qui laisse supposer qu'elle pourrait améliorer leur croissance ; toutefois, ce sujet a été peu étudié. Deux essais en plein champ ont été menés (en 2021 et 2022) afin d'étudier l'effet bénéfique potentiel de films de particules de zéolites naturelles sur les cultures de tomates de transformation. Des zéolites naturelles i) clinoptilolite + et mordénite (CubZeo) et ii) clinoptilolite micronisée (BigZeo) ont été pulvérisées sur les plantes à six reprises au cours des cycles de culture centraux. Dans les deux essais, BigZeo a favorisé la masse sèche (MS) des feuilles et des fruits l'accumulation et la surface foliaire dès les premiers stades de croissance par rapport aux plantes arrosées à l'eau (témoin). La MS aérienne finale des plantes BigZeo a augmenté davantage l'année où les conditions thermiques étaient favorables (+39,2 %) (2022) que celle où elles étaient plus stressantes (2021) (+12,1 %). Parallèlement, le rendement commercialisable a augmenté de +36 % au cours de les deux années, avec des effets positifs également sur la teneur totale en solides solubles des fruits. Sous stress thermique, la culture CubZeo a présenté une MS aérienne encore plus faible que le témoin ; cependant, le rendement commercialisable est resté similaire en raison d'une MS des fruits plus élevée et d'une incidence plus importante de pourriture apicale (BER) chez les plantes non traitées. En 2022, CubZeo a favorisé l'accumulation de MS, l'expansion foliaire et le rendement, même si c'était dans une moindre mesure que le traitement BigZeo. Dans les fruits, les concentrations en K, Ca et Mg ont augmenté chez les plantes traitées à la zéolite. L'amélioration du taux de Ca dans les fruits peut expliquer la moindre occurrence de BER chez les plantes traitées à la zéolite, en particulier avec CubZeo. Le Si a été observé à son niveau le plus élevé dans les fruits et les tiges des plantes traitées au BigZeo, suivies par celles traitées au CubZeo et celles du groupe témoin. L'accumulation de Si pourrait expliquer les meilleures réponses des cultures obtenues avec BigZeo, alors que les réponses observées ne semblaient pas impliquer de modifications du mécanisme photosynthétique. Toutefois, des recherches supplémentaires et approfondies sont nécessaires pour définir les caractéristiques des particules du film de zéolite et les changements physiologiques et nutritionnels associés chez les plantes.

1. Introduction

Les zéolites naturelles se forment sur des sites d'activité volcanique, sur des îles ou dans les zones côtières. Selon leur origine, le type de minéraux qu'elles contiennent peut varier (Jarosz et al., 2022). Les zéolites naturelles les plus connues sont la clinoptilolite, la chabazite, la mordenite, la stilbite, l'érionite, l'heulandite et la phillipsite (Ramesh et Reddy, 2011).

Les zéolites sont des aluminosilicates hydratés caractérisés par une structure tétraédrique composée de $_{SiO_4}$et $_{d'AlO_4}$,reliés par le partage de tous les atomes d'oxygène. Les cavités et les canaux à l'intérieur du réseau aluminosilicate, formant une structure en nid d'abeille nanométrique (Constantinescu-Aruxandei et al., 2020), retiennent les cations ainsi que les molécules d'eau, qui peuvent être éliminées de manière réversible (Reha´kova´ et al., 2004). Les zéolithes étant des solides nanoporeux (Jarosz et al., 2022), ces matériaux présentent des caractéristiques spécifiques, telles que la sélectivité d'adsorption vis-à-vis de certains produits chimiques et ions, de propriétés de tamis moléculaire élevées, de régénérabilité et de modifiabilité de la capacité de sorption. Pour cette raison, elles sont largement utilisées dans les applications industrielles, l'écologie et la protection de l'environnement, la remédiation, la médecine vétérinaire, la médecine et l'agriculture (Jarosz et al., 2022).

L'utilisation agricole des zéolites implique leur application i) comme amendement du sol, ii) comme support pour la libération lente d'herbicides et d'engrais, iii) pour protéger les cultures contre les ravageurs et les maladies, iv) en aquaculture et comme additif alimentaire pour animaux (revue par Reha´kov´a et al., 2004 ; De Smedt et al., 2015 ; Eroglu et al., 2017 ; Jarosz et al., 2022).

En particulier dans les cultures herbacées, il a été démontré que l'application de zéolites au sol entraîne une augmentation des rendements, principalement liée à la nutrition minérale et hydrique des plantes (Noori et al., 2006 ; Ghannad et al., 2014 ; Tsint-skaladze et al., 2017 ; Baghbani-Arani et al., 2020 ; Sedaghat et al., 2022), ainsi que l'activité photosynthétique (Zheng et al., 2018 ; Chatzistathis et al., 2021).

* Auteur correspondant.
Adresse e-mail : giulia.conversa@unifg.it (G. Conversa).

https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127100
Reçu le 24 mai 2023 ; Reçu sous forme révisée le 1er décembre 2023 ; Accepté le 14 janvier 2024
Disponible en ligne le 31 janvier 2024

1161-0301/© 2024 Les auteurs. Publié par Elsevier B.V. Il s'agit d'un article en libre accès sous licence CC BY-NC-ND (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Plus récemment, l'application foliaire de zéolites a été étudiée comme une approche durable pour la lutte contre les ravageurs (De Smedt et al., 2016 ; Rotondi et al., 2021 ; Baghodrat et al., 2021) et des maladies (Calzarano et al., 2020) grâce à la déshydratation réversible des zéolites et à la formation d'un film de particules (De Smedt et al., 2015 ; De Smedt et al., 2016 ; Rotondi et al., 2021 ; Moale et al., 2021). De plus, certaines de ces études, portant principalement sur des cultures arboricoles, indiquent que le film de particules de zéolite affecte i) les caractéristiques foliaires [tant physiologiques (Rotondi et al., 2021 ; Valentini et al., 2021 ; Moale et al., 2021) qu'optiques (Calzarano et al., 2020 ; Moale et al., 2021)], ii) la qualité des produits (Calzarano et al., 2020 ; Rotondi et al., 2021 ; Valentini et al., 2021 ; Moale et al., 2021) et iii) la durée de conservation des produits (Huwei et al., 2021). Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que l'application foliaire de zéolites pourrait constituer une approche innovante pour atténuer les effets du changement climatique sur l'agriculture en contrastant le stress hydrique et le stress thermique (Valentini et al., 2021 ; Jarosz et al., 2022).

De nombreux problèmes se posent pour la productivité des cultures maraîchères en raison
changement climatique (Bisbis et al., 2018), et plus particulièrement pour les cultures de tomates destinées à la transformation, une augmentation prévue (pour la période 2010-2040) de 0,8 à 2,4°C de la température de l'air entraînerait une baisse de 15 % des rendements
(Cammarano et al., 2020). La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est l'un des légumes les plus importants au monde et l'Italie, en particulier, est l'un des principaux producteurs de tomates destinées à la transformation (13 % de la production mondiale en 2020, soit 3,9 millions de tonnes) (World Processing Tomato Council, 2020). La région des Pouilles est la deuxième région italienne la plus importante pour la production de tomates de transformation (plus de 17 000 ha cultivés chaque année, concentrés dans la province de Foggia) (ISTAT, 2022).

À ce jour, les effets de l'application de zéolite sur le feuillage concernant la croissance et le rendement des cultures sont encore peu connus, en particulier pour les cultures maraîchères, bien que plusieurs producteurs commerciaux vantent les propriétés de stimulation de la croissance des zéolites appliquées sur les feuilles, ainsi que leur efficacité en matière de protection des cultures. Il a été suggéré que, puisque les zéolites peuvent adsorber le dioxyde de carbone, un niveau accru de $_{CO_2}$à proximité des stomates pourrait entraîner une amélioration de la photosynthèse foliaire et, par conséquent, de la croissance et de la productivité des plantes (De Smedt et al., 2015). De Smedt et al. (2017) ont mis en évidence une tendance à l'augmentation de la croissance chez les pommiers et les plants de tomates ; toutefois, une photosynthèse nette plus élevée n'a été observée que pour les feuilles de pommier. Cette réponse n'a pas été confirmée dans les études menées sur l'olivier et la vigne (Rotondi et al., 2021 ; Valentini et al., 2021). Une autre hypothèse repose sur l'atténuation potentielle du stress thermique par le film de particules de zéolite, entraînant une amélioration du rendement des cultures (De Smedt et al., 2015 ; Cataldo et al., 2021), ce qui n'a pas été confirmé pour la vigne (Valentini et al., 2021), l'abricotier ou le pêcher (Moale et al., 2021). Dans ces dernières études, l'application foliaire de zéolite a plutôt montré une augmentation des anthocyanes (vigne) et des polyphénols (abricot et pêche), suggérant une réponse impliquant le métabolisme secondaire. Aucune étude publiée n'est disponible concernant l'effet de l'application foliaire de zéolite sur l'état nutritionnel des cultures ; cependant, étant donné que les enrobages de zéolite affectent la physiologie des cultures, on peut émettre l'hypothèse qu'ils pourraient également moduler l'absorption des minéraux. De plus, on manque d'informations sur l'effet de l'enrobage zéolitique sur la nutrition silicique des plantes, bien qu'il soit rapporté que les zéolites produisent du silicium soluble (Constantinescu-Aruxandei et al., 2020 ; Moale et al., 2021), qui est un biostimulant végétal (Laane, 2018).

Sur la base de ces considérations, la présente étude vise à améliorer
les connaissances sur les effets bénéfiques potentiels des films de particules de zéolite naturelle sur la croissance et la productivité des cultures de tomates de transformation, en se concentrant sur les aspects nutritionnels des plantes qui n'ont pas été exploités jusqu'à présent. Dans ce but, deux produits à base de zéolite naturelle ont été testés sous forme de pulvérisation foliaire sur des cultures de tomates afin d'évaluer principalement l'accumulation et la répartition de la biomasse sèche, les paramètres de rendement et les concentrations en nutriments.

2. Matériels et méthodes

2.1. Montage expérimental

Deux essais en plein champ ont été menés en 2021 (exp. 1) et 2022 (exp. 2) dans une exploitation agricole commerciale (41° 25' N, 15° 23' E, 175 m d'altitude – exp. 1 ; 41° 25' N, 15° 22' E, 179 m d'altitude – exp. 2), située dans la plaine de Capitanata à Foggia
province, dans la région des Pouilles (sud de l'Italie). Cette plaine (environ 400 000 ha) est principalement consacrée à la culture du blé dur, qui est cultivé selon un système de rotation de 3 à 4 ans avec des tomates destinées à la transformation et d'autres cultures maraîchères. L'exploitation agricole sélectionnée est représentative des conditions pédoclimatiques de la région, dominée par un climat méditerranéen caractérisé par un hiver doux et un été chaud et sec (Elia et Conversa, 2012).

Les parcelles expérimentales utilisées pour les essais de 2021 et 2022 étaient contiguës les unes aux autres, avec des sols présentant les caractéristiques suivantes : sable, 40,3/38,1 % ; limon, 33,7/38,5 % ; argile, 26,0/23,4 % ; matière organique, 3,0/3,2 % ; azote total (Kjehldahl) 0,165/0,201 % ; P d'Olsen,
47,8/50,8 ppm ; K extractible, 300,8/308,3 ppm ; pH 7,9 (sol:eau 1:2,5), carbonate actif 0,07/0,13 %, CEC 29,6/36,2 meq 100 g^{-1} et C/N 9,7. Dans les deux essais, la culture précédente était le brocoli [*Brassica oleracea* L. conv. *botrytis* (L.) Alef. var. *cymosa* Duch.].

Avant la transplantation, 500 kg ha^{-1} d'engrais superphosphate triple (46 %) (Perfosfato triplo 46 %, Fertilsud s.r.l., Spinazzola (Barletta-Andria-Trani, Italie) et 100 kg ha^{-1} de fumier de poulet (4/3/3) (Italpol-lina, Hello Nature Italia s.r.l., Rivoli Veronese, Vérone, Italie) ont été
appliqués et incorporés au sol. Des engrais minéraux ont également été apportés entre mai et juillet par fertirrigation. Les engrais utilisés étaient : de l'urée phosphatée (17,5–44) (Haifa UP, Haifa Italia s.r.l., Bologne, Italie), nitrate d'ammonium (34,2) (YaraTera Amnitra, Yara Italia s.p.a., Milan, Italie), acide phosphorique (54 %) (Fosforo 54, Biolchim s.p.
a., Medicina, Bologne, Italie), Solinure® GT (10—5-39) (ICL Italy s.r.l., Milan, Italie). Au total, 260, 300, 105 et 148 kg ha^{-1} de N,
P_2O_5, K_2O et $_{SO_4^{2-}}$, respectivement.

La repiquage de la tomate de transformation (*Solanum lycopersicum* L.), cv. Taylor F1 (Nunhems Italy – BASF, Vegetable seeds, S. Agata Bolognese BO, Italie), une variété à fruits oblongs, a été effectué le 8 mai 2021 et le 23 mai 2022 (au stade de la 4e feuille vraie). Les plantules ont été espacées en rangées doubles à 40 cm l'une de l'autre, avec 50 cm entre les rangées et 1,7 m entre les rangées doubles (densité de 2,9 $^{plants/m^2}$).

Les besoins en eau des cultures ont été entièrement satisfaits par irrigation goutte à goutte (tuyau d'irrigation goutte à goutte – Agrifim, émetteurs en ligne, 1,6 L $h^{\wedge(-)1}$, espacés de 0,3 m) jusqu'à une semaine avant la récolte. L'irrigation (5 300 et 4 400 m^3 $ha^{\wedge(-)1}$ dans les
exp. 1 et exp. 2, respectivement) et la fertigation azotée ont été basées sur les recommandations fournies par un système d'aide à la décision (SAD) nommé GesCoN (Elia et Conversa, 2015 ; Conversa et al., 2015) utilisant la plateforme web EcoFert (https://www.ecofert.it/) et son application pour smartphone (Gallardo et al., 2020 ; Elia et al., 2021). Les mauvaises herbes, les ravageurs et les maladies ont été contrôlés conformément aux règles régionales de lutte intégrée contre les ravageurs. Plus précisément, dans l'expérience 1, nous avons effectué six applications de fongicides, quatre applications d'insecticides et une application d'acaricides. Dans le deuxième essai, ces applications ont été ajustées à huit, quatre et zéro, respectivement. Les conditions météorologiques au cours des deux saisons de croissance sont présentées à la figure 1.

2.2. Traitements et plan expérimental

Les zéolites naturelles i) la zéolite cubaine (CubZeo) (Bioagrotech s.r.l., République de Saint-Marin) et ii) Big-Zeo (BigZeo) (Agricola Internazionale s.r.l., Pise, Italie) sont des produits fabriqués à des fins commerciales. La zéolite cubaine contient de la clinoptilolite (67,5 %) et de la mordénite (32,5 %), tandis que BigZeo contient de la clinoptilolite (91 %). Les deux zéolites naturelles diffèrent également par la taille de leurs particules (< 40 μm et D50 < 6 μm pour la zéolite cubaine et Big-Zeo, respectivement), Big-Zeo étant de type micronisé. De plus amples détails sur les caractéristiques minéralogiques et physicochimiques des deux zéolites sont présentés dans le tableau A.1.

Les applications de zéolite ont été réalisées en pulvérisant sur les plants de tomates une solution aqueuse (500 L ha^{-1}) contenant 5 kg de zéolites (conformément aux recommandations du fabricant) à l'aide de pulvérisateurs agricoles montés sur tracteur
équipés d'une rampe de 18 m de long munie d'une buse Albuz 38 (ATR 80-green, Pentair Hypro, Cambridge, Royaume-Uni). Sur les plants témoins, seule de l'eau a été utilisée.

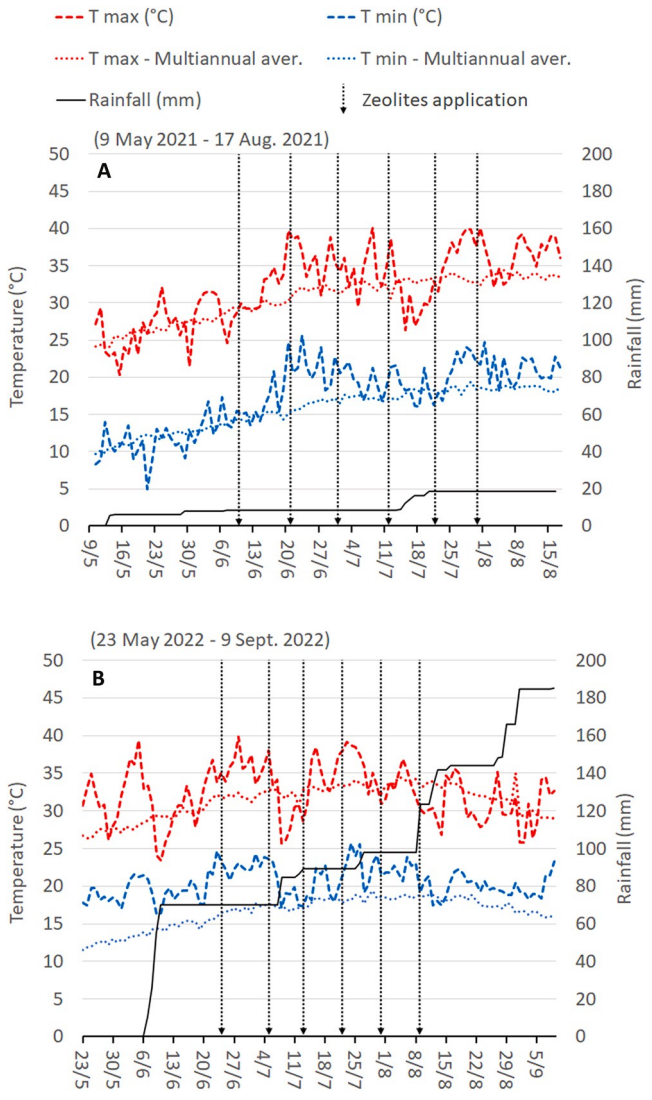


Fig. 1. Températures quotidiennes (minimales, maximales et moyennes pluriannuelles) et précipitations au cours des cycles de culture 2021 (A) et 2022 (B). Les lignes pointillées indiquent les dates d'application de la zéolite : 32, 44, 54, 65, 75 et
84 jours après le semis (DAS), 2021 ; 32, 43, 51, 60, 69, 78 DAS, 2022.

Pour chaque expérience, les traitements CubZeo, BigZeo et Témoin ont été disposés selon un plan en blocs randomisés avec quatre répétitions. L'unité de parcelle expérimentale comprenait 11 rangées doubles et mesurait 18 m de large et 30 m de long.

À partir de près de 30 jours après la transplantation (DAT), des applications de zéolite ont été effectuées à six reprises, à savoir, en 2021 les 10 et 21 juin, les 1er, 12, 22 et 31 juillet (32, 44, 54, 65, 75 et 84 jours après la transplantation, respectivement) (exp. 1) et en 2022 les 24 juin, 5, 13, 22 et 31 juillet ainsi que le 9 août (32, 43, 51, 60, 69, 78 jours après le traitement, respectivement) (exp. 2).

2.3. *Échantillonnage et mesures des plantes*

Au cours des deux saisons de croissance, à partir des cinq doubles rangées les plus intérieures de la parcelle expérimentale, cinq plantes ont été prélevées au hasard (les bordures des rangées jumelées n'ont pas été prises en compte) à 31, 62 et 95 jours après le semis (DAT) et à 36, 64, 80 et 105 jours après le semis (DAT), respectivement pour les expériences 1 et 2. Le poids frais des parties aériennes (feuilles, tiges et fruits) a été déterminé et la surface foliaire a été mesurée à l'aide d'un mesureur de surface foliaire (Li-3100, Licor, Lincoln, NE, États-Unis). Pour déterminer le poids sec, une partie des feuilles, tiges et fruits frais a été séchée dans un étuvoir à 70 °C jusqu'à ce qu'elle atteigne une masse constante. La concentration en matière sèche (MS) a été calculée comme suit : [(poids sec /poids frais) * 100].

L'indice d'efficacité (IE) (Conversa et al., 2013) des traitements à la zéolite a été calculé sur la masse sèche aérienne (gIE) à 95 (exp. 1) et 105 jours après le semis (exp. 2) selon la formule suivante :

gIE_{BZ} = (masse sèche aérienne BigZeo – masse sèche aérienne témoin) / masse sèche aérienne BigZeo x 100.

gIE_{CZ} = (masse sèche aérienne de CubZeo – masse sèche aérienne du témoin) / masse sèche aérienne de CubZeo x 100.

À 65 jours après le semis (DAT) dans l'expérience 2, cinq jours après la 4e application de zéolite, des mesures des échanges gazeux foliaires et de la fluorescence chlorophyllienne ont été effectuées. Le taux de photosynthèse (An), la conductance stomatique à l'H_2O (gs), $_{\text{la concentration}}$ intercellulaire $_{\text{en } CO_2}$ (Ci), le taux de transpiration (E) et l'efficacité du PSII (PhiPS2) ont été mesurés à l'aide d'un système d'échange gazeux infrarouge en circuit ouvert pour les mesures d'échange gazeux foliaire, équipé d'un fluorimètre foliaire et d'une source lumineuse LED, modèle Li-6400XTF (LI-COR Inc., Lincoln, NE, États-Unis), sur un foliolier entièrement déployé de 5 plantes par parcelle selon un plan en blocs randomisés. La température foliaire a été maintenue à 33,5 °C, la concentration $_{\text{en}}CO_2$
à 400 µmol mol^{-1} d'air et la lumière actinique à 1500
µmol $m^{-2}s^{-1}$.

Au moment de la récolte, effectuée à 102 et 109 jours après le semis (DAT) dans les expériences 1 et 2, respectivement
respectivement, le nombre et le poids frais des fruits classés comme commercialisables, non mûrs et non commercialisables (présentant des symptômes de pourriture apicale) ont été évalués sur 20 plants sélectionnés au hasard par unité expérimentale. Les indices de couleur ont été mesurés sur des fruits commerciaux. Ils étaient basés sur l'échelle Cie L*a*b* 1976 : L* , indiquant la clarté/l'obscurité, allant de 0 (noir) à 100 (blanc) sur une échelle de gris ; a* reflétant une tonalité verdâtre (si négative) à rougeâtre (si positive) ; b* indiquant une tonalité bleuâtre (si négative) à jaunâtre (si positive). Ces mesures ont été effectuées sur les images prises à l'aide de la station d'acquisition d'images créée par Immagini & Computer s.n.c. (Bareggio, MI, Italie), équipée de : 4 lampes blanches Tornado ESaver (23 W) (Philips s.p.a., Milan, MI, Italie) ; un appareil photo Nikon D5200 (Nikon Corporation, Tokyo, Japon) ; et du logiciel Image Pro Plus 7.0 (Media Cybernetics Inc., Rockville, MD, États-Unis). De plus, l'angle de teinte (h◦) et l'indice de chroma (C*) ont été évalués.

2.4. *Analyses chimiques*

Les concentrations en azote, phosphore, cations inorganiques et silicium ont été analysées sur du matériel végétal séché prélevé lors du dernier échantillonnage (feuilles, tiges, fruits) des expériences 1 et 2, et broyé à travers un tamis de 1,0 mm (IKA Labortechnik, Staufen, Allemagne). Les échantillons de fruits (40 par unité expérimentale) ont été soigneusement lavés à l'eau distillée avant séchage en vue des analyses chimiques.

L'azote a été déterminé par combustion sèche (méthode de Dumas) à l'aide d'un analyseur élémentaire CHN (FlashEA 1112, ThermoFisher Scientific, Waltham, MA, États-Unis). La teneur en phosphore a été déterminée par la méthode au bleu de molybdène à l'aide d'un spectrophotomètre (Shimadzu UV-1800, Shimadzu Scientific Instruments, Columbia, MD, États-Unis) et selon la procédure décrite par Conversa et al. (2013).

Les cations inorganiques ont été analysés par chromatographie ionique (Dionex ICS 3000 ; Dionex, Sunnivale, CA, États-Unis) selon la méthode rapportée par Bonasia et al. (2010). En bref, ils ont été extraits d'échantillons séchés (1 g), préalablement incinérés (dans un four à moufle à 550 °C pendant 6 h) et digérés à l'acide (20 mL d'HCl 1 mol/L dans de l'eau bouillante pendant 30 min), avant d'être injectés dans le système de chromatographie ionique. Le système de chromatographie ionique était équipé d'une pompe isocratique, d'un détecteur de conductivité, d'un échantillonneur automatique modèle AS-DV (ThermoFisher Scientific, Waltham, MA,
États-Unis), d'un suppresseur DRS-600 à génération automatique (4 mm), d'une colonne analytique Dionex IonPack CS12A (4 × 250 mm, 5 µm) et d'une solution d'élution (acide méthanesulfonique 20 mM) à un débit de 1 mL min^{-1} (Dionex-ThermoFisher Scientific, Waltham, MA, États-Unis).

Pour la détermination de la concentration en Si, 0,3 g d'échantillons séchés ont été incinérés dans un four à moufle à 550 °C et digérés avec 20 mL d'HCl 1 mol/L dans de l'$eau_{\text{bouillante}}$(95 °C) pendant 30 min. La solution obtenue
a été filtrée, diluée et analysée par spectrophotométrie (ASTM D859 : Méthode d'essai standard pour la silice dans l'eau). Les solutions requises

pour cette procédure étaient une solution de molybdate d'ammonium de 7,5 g ($(NH_4)_{,-O(24)4H_2O}$) dans 100 ml d'eau, une solution d'acide oxalique ($H_2C_2O_4$) et une solution d'acide chlorhydrique (HCl)
6Mo 7 -O_{24} 4 H_2 O) dans 100 ml d'eau, une solution d'acide oxalique (H_2 C_2 O_4 2 H_2 O) à une concentration de 10 g L^{-1} , une solution d'acide chlorhydrique à 18 %. La solution réductrice était composée de 30 g d'hydrogénosulfite de sodium
($_{NaHSO_3}$), 1,5 g de sulfite de sodium ($_{Na_2SO_3}$) et 0,5 g d'acide 1-diazo-2-naphtol-4-sulfonique ($H_2NC_{10}H_s(OH)SO_3$ H) dissous dans 200 ml d'H_2O. Cinq ml d'échantillon ou de standard, 100 µl de la solution d'HCl et 200 µl de solution de ($_{(NH_4)_6Mo_7O_{24}\cdot 4H_2O}$ ont été ajoutés en succession rapide. La solution a été mélangée et laissée au repos pendant 5 min. 150 µL d'acide oxalique ont été ajoutés et la solution a été laissée au repos pendant 1 min ; ensuite, 200 µL de la solution réductrice ont été ajoutés, et la solution a été laissée au repos pendant 10 min. L'absorbance des échantillons a été déterminée à 640 nm (Shimadzu UV-1800, Shimadzu Italia S.r.l., Milan, Italie). La quantification du Si dans les extraits a été réalisée par interpolation à l'aide d'une courbe d'étalonnage.

Sur les fruits du commerce, la teneur en solides solubles totaux (TSS) a été déterminée par la méthode réfractométrique (réfractomètre numérique DBR35, Giorgio Bormac s.r.l., Carpi, Italie), conformément à la méthode de l'Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) (méthode n° 932.12) (AOAC, 2000). Pour mesurer le pH, un échantillon frais (10 g) a été mélangé à 100 ml d'eau distillée. Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre (Hanna Instruments Italia s.r.l., Villafranca, Italie).

L'acidité totale titrable a été déterminée selon la méthode n° 942.15 de l'AOAC (AOAC, 2000). Les échantillons frais ont été homogénéisés dans un mixeur, puis filtrés sur papier filtre. Le filtrat a été dilué avec de l'eau distillée et le pH a été mesuré (Hanna Instruments Italia s.r.l., Villafranca, Italie). Ce même filtrat a ensuite été titré avec une solution de NaOH 0,1 N jusqu'à un point final de pH 8,2. Le résultat est exprimé en grammes d'acide citrique pour 100 g de poids frais.

2.5. *Analyse statistique*

Toutes les données ont été analysées statistiquement par ANOVA à l'aide de la procédure GLM (General Linear Model) du logiciel SAS. Le test de Tukey (α = 0,05) a été utilisé pour établir les différences différences entre les moyennes.

3. Résultats

3.1. *Conditions climatiques*

Les températures quotidiennes maximales et minimales, moyennées sur la période de culture, étaient de 32,4 °C et 19,3 °C°C en 2021 (du 9 mai au 17 août) et de 32,4 ° C et 20,4 ° C en 2022 (du 23 mai au 9 septembre), respectivement . Cependant, dans l'expérience 1, entre 40 et 63 jours après le semis (DAT) et à partir de 74 DAT jusqu'à la récolte, les températures maximales ont dépassé 35 °C, atteignant fréquemment des valeurs proches de 40 °C (Fig. 1A). Dans l'essai de 2022, des températures maximales élevées (supérieures à 37 °C) pendant deux jours consécutifs ou plus (vagues de chaleur) se sont rarement produites (fig. 1B). Au cours de l'essai de 2021, les précipitations ont été très faibles (18,7 mm), alors qu'elles ont été bien plus importantes (185,3 mm) lors de l'essai suivant, avec une concentration sur les deux derniers mois du cycle de culture (phase de développement des fruits)

3.2. *Croissance et rendement des cultures*

L'analyse statistique, réalisée sur les données de croissance et de rendement des cultures, y compris celles rapportées au paragraphe 3.3, a mis en évidence un effet « année » fort et significatif (tableau A. 2). En conséquence, les résultats ont été présentés séparément pour chaque année respective.

Dans l'expérience 1, les différences dans l'accumulation totale de matière sèche (MS) aérienne entre les traitements [clinoptilolite micronisée (BigZeo), clinoptilolite + mordenite (CubZeo) ou traitement à l'eau (témoin)] sont apparues à partir de 30 jours après le traitement (DAT). Plus précisément, jusqu'à 62 DAT, la DM aérienne était similaire chez les plantes BigZeo et CubZeo, et les deux présentaient des valeurs plus élevées (P ≤ 0,01) par rapport au témoin (Fig. 2 A). Par la suite, les plantes CubZeo ont montré une augmentation plus lente de l'accumulation de DM que

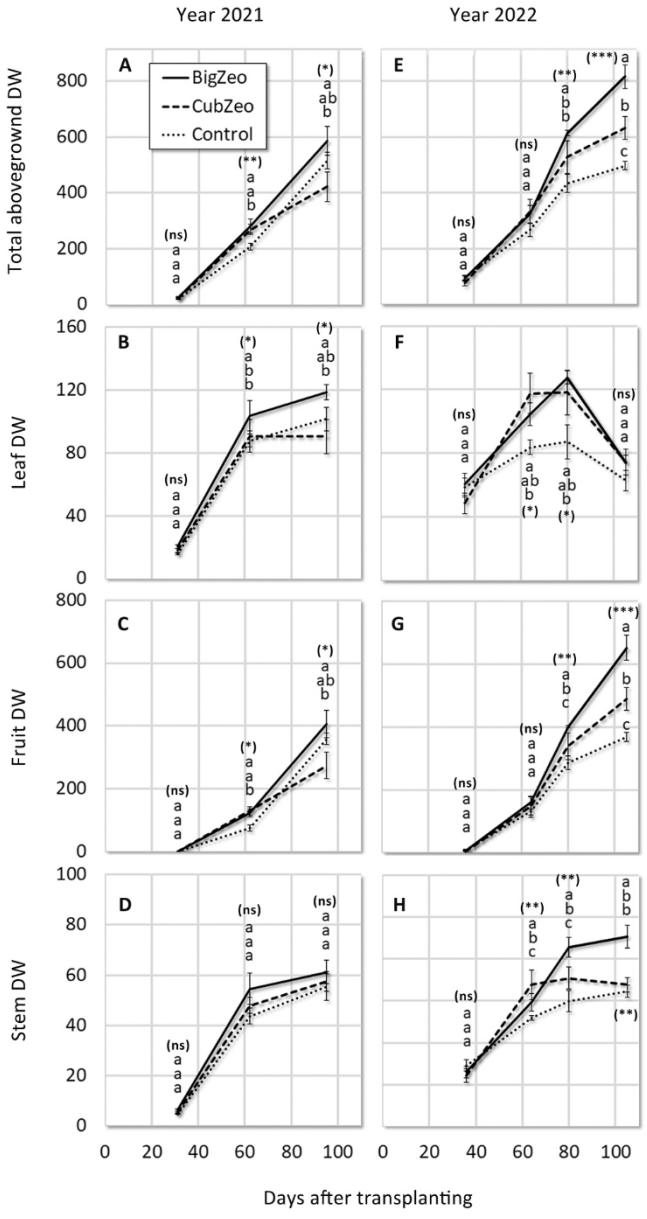


Fig. 2. Accumulation de la matière sèche totale, des feuilles, des fruits et des tiges (g/plante) en 2021 (A, B, C, D, respectivement) et en 2022 (E, F, G, H, respectivement) dans le cadre d'un essai sur les tomates de transformation sous l'effet d'une application foliaire de zéolite cubaine (CubZEo) et de clinoptilolite micronisée (BigZeo). Les barres indiquent la moyenne ± l'écart-type (n = 4). Des lettres différentes indiquent des différences significatives selon le test de Tukey (α = 0,05). Remar-: ns, *, ** et ***, non significatif ou significatif à P ≤ 0,05, P ≤ 0,01 et P ≤ 0,001, respectivement.

les autres, atteignant une valeur inférieure (P ≤ 0,05) (422 g par plante) à la fin du cycle (95 jours après le semis), en particulier par rapport à la culture BigZeo (586 g par plante).

Au cours du cycle de culture, tant l'accumulation de matière sèche foliaire (Fig. 2B) (P ≤ 0,05) que l'expansion foliaire (LAI) (P ≤ 0,05) (Fig. 3A) ont affiché un taux de croissance plus élevé chez les plantes BigZeo que chez les CubZeo et le témoin.

Plus précisément, lors de l'échantillonnage avant la récolte (95 jours après le semis), la MS foliaire a atteint des valeurs de 119 g chez les plantes BigZeo et de 96 g, en moyenne, chez les autres. L'accumulation de biomasse sèche des fruits a suivi la même tendance que la MS totale, avec des valeurs finales plus élevées pour BigZeo (P ≤ 0,05) (406 g par plante) que pour les plantes CubZeo (274 g par plante) et des valeurs intermédiaires pour les témoins (Fig. 2 C). La MS des tiges n'a pas été affectée par les traitements (Fig. 2D).

Dans l'expérience 2, après 64 jours après le semis (DAT), l'augmentation de l'accumulation totale de MS

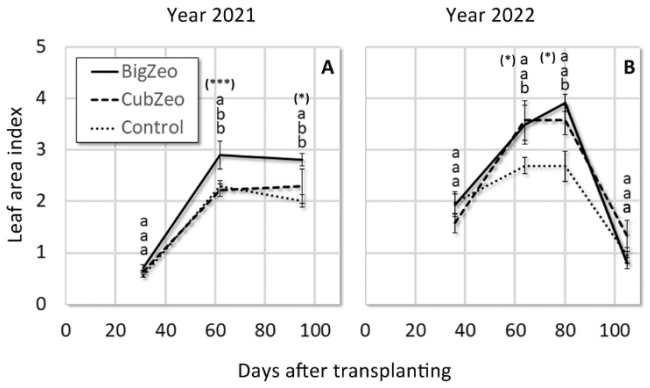


Fig. 3. Indice de surface foliaire dans l'essai sur les tomates de transformation de 2021 (A) et 2022 (B)
en fonction de l'application foliaire de zéolite cubaine (CubZeo) et de clinoptilolite micronisée (BigZeo). Les barres indiquent ± l'écart-type de la moyenne (n = 4). Des lettres différentes indiquent des différences significatives selon le test de Tukey (α = 0,05). Notations : ns, * et **, non significatif ou significatif à P ≤ 0,05 et P ≤ 0,001, respectivement.

chez les plantes traitées aux zéolites était plus marquée que chez le témoin, en particulier entre 80 (P ≤ 0,01) et 105 (P ≤ 0,001) jours après le traitement (DAT) dans le traitement BigZeo (Fig. 2 E). La MS aérienne finale était de 816, 631 et 496 g par plante chez les
plantations BigZeo, CubZeo et témoin, respectivement. De 36 à 64–80 jours après le traitement (DAT), une accumulation accrue de matière sèche foliaire (Fig. 2 F) et une expansion foliaire (Fig. 3B) ont été observées chez les plantes traitées aux zéolites par rapport aux plantes non traitées, suivies d'une réduction pour tous les traitements entre 80 et 105 jours après le traitement (DAT). Une tendance similaire a été enregistrée pour la matière sèche des tiges et des fruits (Fig. 2
H, G). Lors du dernier prélèvement (105 jours après le traitement) (P ≤ 0,001), cette dernière s'élevait à 651,
489 et 368 g par plante pour les plantes BigZeo, CubZeo et témoin,
respectivement, tandis que la MS des tiges était la plus élevée dans le traitement BigZeo (P ≤ 0,01).

Lors de l'essai de 2021, l'application foliaire de la zéolite BigZeo a entraîné une amélioration du poids frais (P ≤ 0,01) et du nombre (P ≤ 0,05) de fruits commercialisables par rapport au CubZeo et au témoin. Aucune différen-
n'a été observée dans la présence de fruits verts et seules les plantes traitées au CubZeo ont présenté un poids (P ≤ 0,05) et un nombre (P ≤ 0,05) de fruits affectés par la pourriture apicale (BER) (tableau 1), tandis que l'incidence de la BER sur la production totale (fruits commercialisables + fruits verts) était de 5,6 %, 8,2 % et 12,8 % respectivement pour les plantes CubZeo, BigZeo et témoin.

Dans la deuxième expérience, les plants BigZeo ont obtenu le rendement commercial le plus élevé (P ≤ 0,001), suivis par les plants CubZeo et Témoin,
tandis que les deux traitements à la zéolite présentaient un nombre plus élevé de fruits commercialisables (P ≤ 0,001) par rapport au témoin. Le poids des fruits non mûrs n'a pas varié pour les trois traitements et la BER est apparue principalement
sur les plants BigZeo (tableau 1) ; cependant, l'incidence de la BER était la plus faible chez CubZeo (5,7 %) par rapport à BigZeo et au groupe témoin (9,9 % en moyenne).

La teneur en matière sèche des fruits commercialisables était la plus élevée dans le groupe témoin (exp. 1 ; P ≤ 0,05) ou dans le traitement BigZeo (exp. 2 ; P ≤ 0,01) (tableau 1) et, pour les deux années, la teneur en solides solubles totaux (TSS) était plus élevée dans le traitement BigZeo que dans le traitement CubZeo (P ≤ 0,001) (tableau 2). La plante du groupe témoin n'a présenté la teneur en TSS la plus élevée que dans les fruits de la première expérience.
Les traitements à la zéolite n'ont pas affecté l'acidité titrable ni le pH, tandis que BigZeo a légèrement réduit la valeur L* (expérience 1) et amélioré l'angle de teinte (expérience 2) (tableau 2).

3.3. *Concentration en minéraux des parties aériennes de la plante*

3.3.1. *Feuilles et tiges*

Parmi les éléments minéraux considérés, seul le P présentait une concentration foliaire plus faible dans les traitements CubZeo (dans les deux expériences) (P ≤ 0,05) et BigZeo (dans l'exp. 2) (P ≤ 0,001) par rapport aux plantes témoins (tableau 3). Des changements similaires ont également été observés dans les tiges (exp. 1, P ≤ 0,001)
(tableau 4). En 2021, une concentration accrue en Si a été détectée dans les feuilles traitées à la zéolite (P ≤ 0,001), tandis que la concentration en sodium dans les feuilles n'a pas été affectée par les traitements et que les différences de concentration en N, K et Mg
entre les traitements n'étaient pas univoques dans les deux essais.

Dans les deux essais, BigZeo a présenté la concentration en Si la plus élevée dans les tiges (P ≤ 0,001, exp. 1 ; P ≤ 0,001, exp. 2), tandis que la concentration des autres éléments dans les tiges n'a pas été (Na), a été très peu (K, Mg) ou n'a pas été de manière univoque
(Ca, N) par les traitements à la zéolite dans les deux essais.

3.3.2. *Fruits*

Dans les deux expériences, les concentrations en phosphore et en azote dans les fruits n'ont pas été affectées par les traitements, sauf dans l'essai de 2022 où une
baisse du taux de N a été observée avec BigZeo (P ≤ 0,01). À l'inverse, les concentrations en K (P ≤ 0,01, exp. 1 ; P ≤ 0,001, exp. 2), Mg (P ≤ 0,01, exp. 1 ; P ≤ 0,01,
exp. 2) et de Ca (P ≤ 0,001, exp. 1 ; P ≤ 0,05, exp. 2) ont été
améliorées par les traitements à la zéolite et, en particulier dans l'exp. 2, celle du K était
la plus élevée dans les fruits traités au BigZeo. La teneur en sodium était plus élevée dans le groupe témoin que dans les fruits traités au BigZeo (P ≤ 0,001) (exp. 1) ou au CubZeo (P ≤ 0,001) (exp. 2). En particulier dans l'expérience 2 (P ≤ 0,001), la
a augmenté des fruits du groupe témoin à ceux traités au CubZeo et au BigZeo (tableau 5).

Tableau 1
Caractéristiques de rendement des plants de tomates de transformation sous l'effet de l'application foliaire de deux types de zéolite lors d'essais en plein champ menés en 2021 (essai 1) et en 2022 (essai 2).

Traitements [3]	Commercialisable		Non mûrs		BER		Matière sèche
	(nb.)	(g/plante)	(nb)	(g/plante)	(nb)	(g/plante)	(g/kg $^{-1}$ poids frais)
	Expérience 1						
BigZeo	71,3 a[1]	5011 a	14,1 a	729 a	10,2 ab	473 a	49,5 ab
	(± 5,2)	(±331)	(±11,3)	(±196)	(± 4,7)	(±116)	(±2,0)
CubZeo	60,6 b	3808 b	16,9 a	726 a	5,5 b	255 b	46,1 milliards
	(±3,8)	(±302)	(±8,3)	(±381)	(±1,8)	(±88)	(±3,5)
Témoin	54,6 b	3204 b	14,1 a	618 a	17,2 a	490 a	60,1 a
	(±3,6)	(±331)	(±3,7)	(±167)	(±3,4)	(±122)	(±2,0)
Signification[2]	*	**	ns	ns	*	*	*
	Expérience 2						
BigZeo	91,4 a	5878 a	18,2 a	788 a	16,7 a	664 a	55,5 a
	(±5,7)	(±164)	(±4,6)	(±177)	(±1,2)	(±67)	(±1,3)
CubZeo	84,3 a	5220 b	9,0 a	443 a	8,3 b	322 b	50,5 milliards
	(±2,6)	(±168)	(±2,6)	(±160)	(±1,3)	(±43)	(±1,7)
Témoin	54,2 b	3813c	17,3 a	573 a	8,7 b	433 b	50,7 b
	(±4,4)	(±297)	(±4,0)	(±246)	(±2,4)	(±127)	(±3,0)
Signification[2]	***	***	ns	ns	*	**	**

[1] Les lettres différentes au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives selon le test de Tukey (α = 0,05)

[2] ns, * et **, respectivement non significatif, significatif à $P \leq 0,05$ et significatif à $P \leq 0,01$.

[3] BigZeo : zéolite micronisée Big-Zeo, Agricola Internazionale, s.r.l. ; CubZeo : zéolite cubaine, Bioagrotech s.r.l.

Tableau 2
Paramètres de qualité des fruits de plants de tomates de transformation sous l'effet de l'application foliaire de deux types de zéolite lors d'essais en plein champ menés en 2021 (essai 1) et en 2022 (essai 2).

Traitements [3]	Solides solubles totaux · Brix	pH	Acidité titrable (g[(1)] /100 ml de jus)	L*	Angle de teinte	Chroma
	Expérience 1					
BigZeo	5,2 b[(2)]	4,2 a	0,35 a	67,1 b	49,5 a	49,4 a
	(±0,1)	(±0,01)	(±0,02)	(±0,4)	(±0,4)	(±0,5)
CubZeo	4,6c	4,2 a	0,35 a	66,2 b	50,0 a	48,4 a
	(±0,2)	(±0,02)	(±0,01)	(±0,9)	(±0,5)	(±0,7)
Témoin	5,9 a	4,2 a	0,35 a	68,1 a	49,4 a	48,5 a
	(±0,1)	(±0,02)	(±0,01)	(±0,7)	(±0,5)	(±0,5)
Signification[(3)]	***	ns	ns	*	ns	ns
	Expérience 2					
BigZeo	4,7 a	4,7 a	0,31 a	71,4 a	50,9 b	51,5 a
	(±0,1)	(±0,02)	(±0,01)	(±0,5)	(±1,1)	(±0,6)
CubZeo	4,5 b	4,6 a	0,32 a	72,1 a	52,4 a	51,9 a
	(±0,1)	(±0,02)	(±0,01)	(±0,4)	(±0,9)	(±0,6)
Témoin	4,4 b	4,7 a	0,31 a	72,1 a	51,8 ab	52,4 a
	(±0,1)	(±0,02)	(±0,01)	(±0,6)	(±0,9)	(±0,7)
Signification[(3)]	***	ns	ns	ns	**	ns

(1) Acide citrique monohydraté

(2) Les lettres différentes au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

(3) ns,* , * *, * ** : non significatif ou significatif à $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ et $P \leq 0,001$, respectivement

[3] BigZeo : zéolite micronisée Big-Zeo, Agricola Internazionale, s.r.l. ; CubZeo : zéolite cubaine, Bioagrotech s.r.l.

Tableau 3
Concentrations en nutriments dans les feuilles de plants de tomates de transformation sous l'effet de l'application foliaire de deux types de zéolite lors des essais en plein champ de 2021 (expérience 1) et 2022 (expérience 2).

Traitements[3]	Na (mg•kg^{-1} poids sec)	K	Mg	Ca	P	N	Si
	Expérience 1						
BigZeo	2943 a[(1)]	16917 ab	7729 b	51492 a	1166 a	2,17 a	1878 a
	(±141)	(±518)	(±279)	(±1 443)	(±40)	(±0,08)	(±101)
CubZeo	3150 a	17609 a	8156 b	52 087 a	1045 b	1,94 b	2004 a
	(±140)	(±791)	(±219)	(±1 913)	(±34)	(±0,09)	(±74)
Témoin	2893 a	15501 b	9696 a	49 417 a	1168 a	1,85 b	1633 b
	(±95)	(±577)	(±289)	(±1 064)	(±38)	(±0,10)	(±60)
Signification[(2)]	ns	*	***	ns	*	**	***
	Expérience 2						
BigZeo	1531 a	10273 b	5105 a	45951 a	2305 b	1,64 b	1600 a
	(±100)	(±475)	(±280)	(±865)	(±70)	(±0,03)	(±89)
CubZeo	1751 a	11498 b	3024 b	39 309 b	2232 b	1,73 b	1622 a
	(±96)	(±480)	(±213)	(±870)	(±75)	(±0,05)	(±89)
Témoin	1559 a	13609 a	3189 b	42 731 a	2747 a	2,39 a	1544 a
	(±69)	(±652)	(±194)	(±1 042)	(±97)	(±0,09)	(±33)
Signification[(2)]	ns	***	***	***	***	***	ns

Les lettres différentes au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$). ns, * et ** signifient respectivement « non significatif » et « significatif à $P \leq 0,001$ ».

[3] BigZeo : zéolite micronisée Big-Zeo, Agricola Internazionale, s.r.l. ; CubZeo : zéolite cubaine, Bioagrotech s.r.l.

3.4. État physiologique des feuilles

Les échanges gazeux et la fluorescence foliaires mesurés cinq jours après la 4e application de zéolite dans l'essai de 2022 sont présentés dans le tableau 6. Le taux de photosynthèse (An), la conductance stomatique (gs), le taux de transpiration (E) et l'efficacité du photosystème II (PhiPS2) étaient plus faibles dans les feuilles traitées au CubZeo par rapport aux autres traitements ($P \leq 0,05$). En ce qui concerne la concentration intercellulaire de CO_2 (Ci), aucune différence significative n'est apparue entre les feuilles traitées à la zéolite et feuilles témoins.

4. Discussion

4.1. Effet de l'application foliaire de zéolite sur la croissance et la productivité des cultures

Dans les deux expériences, l'application foliaire de BigZeo a favorisé l'accumulation de biomasse sèche (Fig. 2), bien que l'indice d'efficacité de croissance (gIE_{BZ}) ait été beaucoup plus élevé en 2022 (39,2 %) qu'en 2021 (12,1 %). Lors de l'essai de 2021, des températures élevées très stressantes ont été enregistrées, en particulier pendant les

périodes de nouaison (40 à 63 jours après la plantation) et de maturation (74 jours après la plantation jusqu'à la récolte) (Fig. 1A). Par conséquent, dans ces conditions, l'effet positif de cette zéolite sur la croissance des plantes a pu être partiellement contrecarré.

Tableau 2

L'amélioration de la croissance des plantes traitées au BigZeo pourrait être liée à l'expansion foliaire accrue qui a été favorisée dès les premiers stades de la culture (fig. 3A, B). Il est bien connu que l'expansion de la surface foliaire et l'architecture du couvert végétal jouent un rôle crucial dans la détermination de la croissance des plantes en modulant l'interception de la lumière pour la photosynthèse (Marcelis et al., 1998 ; Conversa et Elia, 2019 ; Conversa et al., 2019). Outre la photosynthèse du couvert végétal, la croissance des plantes peut être influencée par la capacité photosynthétique au niveau des feuilles (Albrizio et Steduto, 2003). Dans cette étude, aucune différence n'a été observée entre les plantes traitées au BigZeo et les plantes non traitées en termes de photosynthèse nette et d'efficacité du photosystème II, tandis que le traitement au BigZeo a tendance à améliorer la conductance stomatique et le taux de transpiration (tableau 4). Concernant l'application de la zéolite cubaine, les résultats ont été nettement influencés par les conditions climatiques observées lors des deux essais. En 2022, lorsque les températures se situaient dans une fourchette non stressante pour la tomate

Tableau 4
Concentrations en nutriments dans les tiges de plants de tomates de transformation sous l'effet de l'application foliaire de deux types de zéolite lors des essais en plein champ de 2021 (expérience 1) et 2022 (expérience 2).

Traitements [3]	Na (mg•kg^{-1} de poids sec)	K	Mg	Ca	P	N	Si
	Expérience 1						
BigZeo	3403a[(1)]	22242a	5555 a	28889 a	1208 ab	1,56 a	1837 a
	(±172)	(±1060)	(±247)	(±1 422)	(±57)	(±0,07)	(±93)
CubZeo	3249 a	21986 a	5345 a	29 450 a	1136 b	1,41 a	1542 b
	(±124)	(±829)	(±247)	(±1 535)	(±35)	(±0,07)	(±60)
Témoin	3392a	21244 a	5635 a	23574 b	1338 a	1,48 a	1297c
	(±143)	(±817)	(±243)	(±1 060)	(±43)	(±0,08)	(±48)
Signification[(2)]	ns	ns	ns	***	***	ns	***
	Expérience 2						
BigZeo	690 a	12787 a	571 b	11 943 b	2135 a	1,50 b	883 a
	(±35)	(±501)	(±32)	(±592)	(±92)	(±0,08)	(±31)
CubZeo	658 a	8244 b	788 a	10682 b	1917 a	1,75 b	704 b
	(±33)	(±331)	(±48)	(±465)	(±90)	(±0,09)	(±22)
Témoin	758 a	12594 a	707 a	16 670 a	2102 a	2,04 a	671 b
	(±36)	(±669)	(±34)	(±923)	(±70)	(±0,07)	(±27)
Signification[(2)]	ns	***	**	***	ns	***	***

Les lettres différentes au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives selon le test de Tukey (α = 0,05). ns, * *, * ** : non significatif ou significatif à P ≤ 0,01 et P ≤ 0,001, respectivement
[3] BigZeo : zéolite micronisée Big-Zeo, Agricola Internazionale, s.r.l. ; CubZeo : zéolite cubaine, Bioagrotech s.r.l.

Tableau 5
Concentrations en nutriments dans les fruits de plants de tomates de transformation sous l'effet de l'application foliaire de deux types de zéolite lors d'essais en plein champ en 2021 (expérience 1) et 2022 (expérience 2).

Traitements[3]	Na (mg•kg^{-1} poids sec)	K	Mg	Ca	P	N	Si
	Expérience 1						
BigZeo	4857 b[(1)]	50128 a	4149 a	4812 a	4914 a	3,13 a	1172 a
	(±218)	(±2468)	(±204)	(±267)	(±118)	(±0,12)	(±67)
CubZeo	6717 a	49 390 a (± 2 804)	4073 a	5169 a	4883 a	3,24 a (± 0,10)	1126 ab
	(±403)		(±176)	(±225)	(±240)		(±36)
Témoin	6157 a	37583 b	3424 b	3469 b	4760 a	3,04 a	1048 b
	(±310)	(±1668)	(±150)	(±137)	(±198)	(±0,10)	(±21)
Signification[(2)]	***	**	**	***	ns	ns	*
	Expérience 2						
BigZeo	1344 a	30282 a	1047 ab	1177 a	4209 a	2,03 b	858 a
	(±58)	(±893)	(±48)	(±45)	(±113)	(±0,13)	(±13)
CubZeo	1104 b	28276 b	1131 a	1284 a	4079 a	2,41 a	822 b
	(±34)	(±786)	(±51)	(±65)	(±96)	(±0,14)	(±13)
Témoin	1259 a	25967c	956 b	997 b	3954 a	2,29 a	746c
	(±50)	(±299)	(±43)	(±40)	(±126)	(±0,08)	(±13)
Signification[(2)]	***	***	**	*	ns	**	***

Les lettres différentes au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives selon le test de Tukey (α = 0,05). ns, *, **, *** : non significatif ou significatif à P ≤ 0,05, P ≤ 0,01 et P ≤ 0,001, respectivement
[3] BigZeo : zéolite micronisée Big-Zeo, Agricola Internazionale, s.r.l. ; CubZeo : zéolite cubaine, Bioagrotech s.r.l.

Tableau 6
Échanges gazeux foliaires et fluorescence chlorophyllienne des feuilles de tomates de transformation sous l'effet de l'application foliaire de deux types de zéolite lors des essais en plein champ de 2022 (expérience 2).

Traitements[3]	Taux de photosynthèse	Conductance stomatique à l'H_2O	[CO_2] intercellulaire	Taux de transpiration	PhiPS2
	(µmol m^{-2}s^{-1}de CO_2)	(mol m^{-2}s^{-1})	(µmol mol^{-1})	(mmol m^{-2}s^{-1})	
BigZeo	**30,3 a[(1)]**	**0,81 a**	**303,0 a**	**15,9 a**	**0,33 a**
	(±1,2)	**(±0,03)**	**(±2,6)**	**(±0,2)**	**(±0,01)**
CubZeo	**26,6 b**	**0,68 b**	**303,3 a**	**14,6 b**	**0,29 milliard**
	(±1,2)	**(±0,05)**	**(±2,9)**	**(±0,5)**	**(±0,02)**
Témoin	**30,6 a**	**0,77 ab**	**296,5 a**	**15,2 ab**	**0,33 a**
	(±0,6)	**(±0,06)**	**(±3,3)**	**(±0,5)**	**(±0,01)**
Signification[(2)]	*	*	**ns**	*	*

[(1)] Les lettres différentes au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives selon le test de Tukey (α = 0,05).
[(2)] ns et * , respectivement non significatif ou significatif à p ≤ 0,05.
[3] BigZeo : zéolite micronisée Big-Zeo, Agricola Internazionale, s.r.l. ; Cub-Zeo : zéolite cubaine, Bioagrotech s.r.l.

culture, la croissance a été favorisée, reflétant le profil des plantes BigZeo en termes d'accumulation de matière sèche (Fig. 2 E, F, G, H) et d'expansion foliaire (Fig. 3B). Cependant, une amélioration différente de la biomasse sèche entre les deux zéolites a été mise en évidence par rapport au témoin, le gIE_{CZ} étant plus faible chez les plantes traitées au CubZeo que chez celles traitées au BigZeo (21,5 % contre 39,2 %). Les réponses des cultures traitées à la zéolite ne semblaient pas être liées aux

mesures écophysiologiques (tableau 4), qui ont mis en évidence que l'application de zéolite cubaine réduisait l'efficacité du photosystème II et la photosynthèse nette en particulier, même par rapport aux plantes témoins.

Ces études préliminaires suggèrent que l'effet de ces zéolites sur la croissance de la tomate pourrait ne pas être médié par le mécanisme photosynthétique, malgré une tendance à l'augmentation de la concentration intercellulaire $_{de\ CO_2}$observée dans les feuilles BigZeo et CubZeo (Ci, tableau 4). De même, dans les feuilles d'olivier, l'effet positif du film de particules de zéolite sur la concentration$_{en\ CO_2}$ne correspondait pas à une augmentation du taux de photosynthèse (An) (Rotondi et al., 2021).

En 2021, on a observé une réaction négative des cultures à l'application de zéolite cubaine, se traduisant par une diminution de l'accumulation de biomasse totale sèche (fig. 2 A) par rapport aux traitements « Témoin » et « BigZeo », respectivement de 22,0 % et 38,9 %. Ce résultat suggère un effet inhibiteur de l'application foliaire de CubZeo sur l'activité photosynthétique ; toutefois, les paramètres photosynthétiques n'ont pas été mesurés dans cette partie de l'expérience. En ce qui concerne la répartition de la matière sèche (MS), une diminution de l'accumulation de MS dans les fruits a été observée chez les plants traités au CubZeo (65 % contre 69,4 % en moyenne) lors de l'essai de 2021, tandis que l'année suivante, l'application des deux zéolites a entraîné une allocation plus élevée de biomasse sèche dans les fruits (78 % en moyenne contre 74 %), probablement favorisée par un feuillage plus étendu (Fig. 3B).

En termes de rendement, l'enrobage foliaire avec BigZeo a amélioré la production commercialisable de 36 % et la qualité organoleptique des fruits (TSS, tableau 2), indépendamment des conditions climatiques différentes observées au cours des deux années,

tandis que le film de particules à base de zéolite cubaine s'est révélé efficace (+27 % de rendement)
uniquement lorsque les températures n'étaient pas trop élevées. Dans des conditions thermiques moins favorables
(2021), le rendement commercialisable des plantes traitées au CubZeo est resté similaire à celui du témoin, malgré la différence d'accumulation de matière sèche (MS) dans les fruits (Fig. 2 C). Cela suggère que l'enrobage au CubZeo a pu améliorer l'état hydrique des plantes par rapport aux plantes témoins. Ces dernières semblent avoir subi un stress thermique/hydrique plus important, car elles ont présenté certains symptômes bien connus associés, tels qu'une diminution de la teneur en eau des fruits (teneur en MS des fruits la plus élevée – Tableau 1 – et concentration en TSS la plus élevée – Tableau 2), ainsi qu'une incidence plus élevée de BER (près de 13 %). En moyenne sur plusieurs années, le film de particules de zéolite a réduit l'incidence du BER par rapport aux plantes témoins (12 %). L'effet était plus marqué avec la zéolite de type Cuban (5,6 %) qu'avec celle de type BigZeo (9,0 %). L'apparition de ce trouble physiologique chez les fruits de tomate est due à une carence en Ca liée à une réduction du flux de transpiration sous l'effet du stress thermique et hydrique et/ou à la compétition entre les feuilles et les fruits, qui sont les principaux puits de Ca (de Freitas et al., 2011). Dans cette étude, dans les deux essais, le revêtement des feuilles par la zéolite a entraîné une augmentation de la concentration en Ca des fruits (tableau 4), ce qui explique la moindre occurrence du BER, en particulier chez les plants CubZeo. Les ajustements physiologiques chez les plants traités à la zéolite, conduisant à une amélioration de la teneur en Ca des fruits sans affecter la teneur de ce cation dans les feuilles (tableau 3), méritent une étude plus approfondie. Le taux de transpiration pourrait avoir été influencé par les propriétés réfléchissantes attribuées aux particules du film de zéolite, qui réduisent à leur tour la température des feuilles. Pour l'enrobage à la zéolite cha-bazite, une diminution de la réflectance lumineuse des feuilles d'olivier (Rotondi et al., 2021) ou de la température des feuilles de vigne (Calzarano et al., 2021) a été démontrée. L'application foliaire de clinoptilolite a réduit la température des feuilles d'abricotier et de pêcher (Moale et al., 2021), tandis qu'une réduction de la température des baies de vigne a été observée avec une zéolite mal caractérisée (Valentini et al., 2021) ; toutefois, aucune donnée n'est disponible pour les cultures maraîchères.

Les changements décrits en termes de rendement, de matière sèche des fruits, de teneur en Ca et de BER
soulignent les différences entre les zéolites en termes de propriétés du film particulaire, CubZeo s'avérant efficace pour maintenir l'équilibre hydrique chez les plantes soumises à un stress thermique. D'autre part, ces résultats ne permettent pas d'expliquer la meilleure réponse obtenue par la zéolite BigZeo sur la croissance des plantes, en particulier sous stress thermique, ce qui constitue une différence substantielle entre les deux produits. Il est probable que les changements dans leur composition (91 % de clinoptilolite dans BigZeo et clinoptilolite : mordenite 70 : 30 dans la zéolite cubaine) et dans la forme et/ou la taille des particules, beaucoup plus petites dans BigZeo (taille < 6 µm contre < 40 µm, tableau A.1), puissent être à l'origine de ces résultats. Néanmoins, dans cette étude,

aucune mesure écophysiologique approfondie ni aucune analyse des caractéristiques physiques des particules du film de zéolite n'ont été effectuées, l'objectif principal étant de contribuer à combler les lacunes dans les connaissances sur l'effet de ces films sur la croissance d'une culture maraîchère.

4.2. Effet de l'application foliaire de zéolite sur la nutrition des plantes

Notre hypothèse selon laquelle le revêtement des feuilles par la zéolite pourrait influencer indirectement l'absorption des nutriments par les plantes en modulant les processus physiologiques a été confirmée, au moins pour le K, le Ca et le Mg. La concentration de ces nutriments dans les fruits, qui représentent 70 à 80 % de la biomasse sèche totale, a augmenté chez les plantes traitées à la zéolite
, en particulier lors de la première expérience (+32 %, +44 % et
+20 %, respectivement). Il semble peu probable que les zéolites fournissent ces cations, compte tenu de la très faible dose d'application (5 kg ha^{-1}). De plus, une étude portant sur un engrais foliaire enrichi en zéolite à base de clinoptilolite n'a pas mis en évidence de différences de composition chimique par rapport à l'engrais foliaire sans zéolite (Moale et al., 2021). On pourrait donc supposer une absorption plus efficace de ces cations par les plantes traitées, quel que soit le type de zéolite, et les mécanismes physiologiques en cause devraient être étudiés, parallèlement à l'effet réducteur des zéolites sur l'accumulation de P dans les parties végétatives (tableaux 3, 5).

Même si l'amélioration de la nutrition en cations peut être associée à l'effet de stimulation générale de la croissance des zéolites, elle ne peut expliquer la différence observée entre les plantes traitées au BigZeo et celles traitées au Cubzeo.

Quant au silicium (Si), c'est dans les fruits (tableau 5) et les tiges (tableau 4) des plantes traitées au BigZeo qu'on a observé les concentrations les plus élevées, suivies par celles des plantes traitées au CubZeo et du témoin. Le silicium détecté dans les fruits des plantes traitées peut sans aucun doute être attribué à l'accumulation dans les tissus, car ceux-ci ont été soigneusement lavés avant l'analyse des échantillons afin d'éliminer les résidus de zéolite. On peut donc en déduire que le Si a été absorbé par les feuilles et que les fruits constituent un puits pour cet élément.

Étant donné que la forme biodisponible du silicium est l'acide monosilicique soluble (H_4SiO_4) (Ma et Yamaji, 2006), on peut émettre l'hypothèse de sa formation dans les films de revêtement de zéolite, en particulier dans le cas de BigZeo. Il est rapporté que le Si soluble dans le sol résulte de l'altération chimique des minéraux silicatés (Constantinescu-Aruxandei et al., 2020) ; néanmoins, à ce jour, aucune information publiée n'est disponible ni sur la production de Si soluble, ni sur l'accumulation de Si par les plantes lorsque des zéolites sont appliquées sur le feuillage.

Il est bien connu que le silicium est un élément bénéfique pour les plantes, intervenant dans de nombreux processus visant à activer la croissance végétale et à atténuer les stress biotiques et abiotiques tels que le stress thermique (Mir et al., 2022).

Dans plusieurs études passées en revue par Laane et al. (2018), il est rapporté que les pulvérisations foliaires à base d'acide salicylique stabilisé augmentent la croissance, le rendement et les paramètres de qualité, en particulier en présence de facteurs de stress. Dans le cadre de l'essai de 2021, l'application foliaire d'un produit commercial à base de Si contenant de l'acide salicylique stabilisé a également été réalisée (données non publiées) et a donné lieu à des concentrations de Si dans les feuilles, les fruits et les tiges (respectivement 1680, 1594
et 950 mg/kg $^{-1}$ de matière sèche, respectivement) très similaires à celles des plantes traitées au BigZeo
. Parallèlement, les cultures traitées au Si et au BigZeo ont présenté une
croissance et un rendement similaires. Ce résultat corrobore l'hypothèse selon laquelle les particules de film de zéolite, en particulier celles de type BigZeo, auraient pu fournir du H_4 SiO_4aux feuilles. De plus, l'accumulation de Si principalement favorisée par le BigZeo pourrait expliquer les meilleures réponses des cultures obtenues par cette zéolite, tant dans des conditions climatiques stressantes que non stressantes

5. Conclusions

À notre connaissance, il s'agit de la première étude portant sur les effets de l'application foliaire de zéolites naturelles sur la croissance, la productivité et la nutrition d'une culture maraîchère.

Il a été démontré que, quel que soit le type de zéolite, les enrobages foliaires améliorent la nutrition des plantes en K, Mg et Ca, et que ce dernier élément s'est avéré utile pour lutter contre le trouble physiologique qu'est la pourriture apicale.

La principale différence entre les zéolites réside dans l'accumulation de Si. Le film de particules de clinoptilolite micronisée (BigZeo) augmente au moins la

teneur en Si des fruits plus que la zéolite cubaine. Cet élément étant classé comme substance biostimulante, cela peut expliquer l'effet positif plus marqué de cette zéolite sur la croissance et le rendement des cultures de tomates. Il convient de noter que la clinoptilolite micronisée est plus efficace pour contrer le stress lié aux températures élevées. Cette caractéristique rend l'utilisation de cette zéolite extrêmement intéressante dans un scénario de changement climatique, où les cultures maraîchères souffriront particulièrement de l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements climatiques extrêmes tels que les vagues de chaleur. Dans de telles conditions, l'application de la zéolite cubaine semble plus discutable, car elle semble induire une diminution de la production de biomasse sèche. Pour comprendre les mécanismes impliqués dans les réponses des plantes et exploiter efficacement la pulvérisation foliaire de zéolites, des recherches approfondies supplémentaires sont nécessaires afin de définir les caractéristiques des particules du film de zéolite, telles que les propriétés structurelles des zéolites, ainsi que les changements associés en termes de réflectivité lumineuse des feuilles, de température et de paramètres écophysiologiques. De plus, des études devraient être menées pour confirmer la libération d'espèces solubles de silicium et pour explorer l'activation du métabolisme secondaire, car celle-ci est généralement liée à la nutrition en silicium.

Financement

Cette recherche n'a bénéficié d'aucune subvention spécifique de la part d'organismes de financement

Annexe

Tableau A.1
Composition et caractéristiques physico-chimiques de deux zéolites naturelles disponibles dans le commerce (zéolite cubaine et zéolite BigZeo).

	Unité	Zéolite Cuban	BigZeo
Composition minéralogique			
Clinoptilolite	g 100 g^{-1}	67,5 (± 10)	91 (±1)
Mordenite	g 100 g^{-1}	32,5 (± 10)	
Cristobalite	g 100 g^{-1}		4
Mica	g 100 g^{-1}		2
Plagioclase	g 100 g^{-1}		1,5 (±0,5)
Composition chimique			
SiO_2	g 100 g^{-1}	65,65	80,2
Al_2O_3	g 100 g^{-1}	11,02	11,8
Na_2O	g 100 g^{-1}	1,07	0,8
K_2O	g 100 g^{-1}	1,74	2,8
CaO	g 100 g^{-1}	2,68	4,0
MgO	g 100 g^{-1}	0,93	0,9
Fe_2O_3	100 g $^{-1}$	1,60	1,3
TiO_2	g 100 g^{-1}	0,26	0,2
Si/Al	g 100 g^{-1}	~ 5	4,8-5,4
Propriétés physico-chimiques			
Taille des particules	µm	< 40	< 6
Taille des pores	nm	-	0,4
Surface spécifique	m^{2}g^{-1}	-	30-60
Capacité d'échange cationique	mol(+)kg^{-1}	1,86	1,90
Densité	g cm^{-3}	2,2	2,3

Tableau A.2
Signification de l'effet « Année » (2021 et 2022) sur les caractères analysés.

Caractère	Signification (1)
Fruits commercialisables (nb./plant)	***
Fruits commercialisables (g/plant)	* **
Fruits non mûrs (nb./plant)	ns
Fruits non mûrs (g/plant)	ns
Fruits BER (nb/plant)	ns
Fruits BER (g/plante)	ns
Matière sèche des fruits (g/kg $^{-1}$poids frais)	ns
pH des fruits	***
Solides solubles totaux du fruit (° Brix)	ns
Acidité titrable des fruits (g/100 ml de jus)	***
Fruit - L	***

(*suite à la page suivante*)

Déclaration de contribution des auteurs CRediT

Elia Antonio : Méthodologie, Supervision, Visualisation, Rédaction – révision et édition. **Lazzizera Corrado :** Recherche. **Bonasia Anna :** Recherche. **Pacifico Salvatore :** Recherche, Ressources. **La Rotonda Paolo :** Recherche. **Conversa Giulia :** Conceptualisation, Analyse formelle, Méthodologie, Rédaction – version originale, Rédaction – révision et édition.

Déclaration de conflits d'intérêts

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts financier connu ni aucune relation personnelle susceptible d'influencer les travaux présentés dans cet article.

Disponibilité des données

Les données seront mises à disposition sur demande.

Tableau A.2 (*suite*)

Caractère	Signification (1)
Fruit - h °	***
Fruit - Chroma	***
Fruit - Na (mg•kg^{-1DW})	***
Fruit-K (mg•kg$^{-1poids\ sec}$)	***
Fruit-Mg (mg•kg^{-1sec})	***
Fruit-Ca (mg•kg^{-1sec})	***
Fruit-P (mg/kg $^{-1sec}$)	***
Fruit-N (mg•kg$^{-1poids\ sec}$)	***
Fruit-Si (mg•kg^{-1sec})	***
Tige-Na (mg•kg^{-1sec})	***
Tige-K (mg•kg^{-1MS})	***
Stem-Mg (mg•kg^{-1DW})	***
Stem-Ca (mg•kg^{-1DW})	***
Tige-P (mg•kg^{-1DW})	***
Stem-N (mg•kg^{-1DW})	***
Stem-Si (mg•kg^{-1DW})	***
Feuille-Na (mg•kg^{-1sec})	***
Feuille-K (mg•kg^{-1sec})	***
Mg foliaire (mg•kg^{-1sec})	***
Ca dans les feuilles (mg•kg^{-1sec})	***
Leaf-P (mg•kg $^{-1sec}$)	***
N foliaire (mg•kg^{-1sec})	ns
Si foliaire (mg•kg^{-1sec})	***

(1) ns et * ** , *respectivement* non significatif ou significatif à $p \leq 0{,}001$.

Références

Albrizio, R., Steduto, P., 2003. Photosynthèse, respiration et efficacité de l'utilisation conservatrice du carbone chez quatre cultures de plein champ. Agric. For. Meteorol. 116, 19–36. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00252-6.

AOAC, 2000. Méthodes d'analyse officielles de l'AOAC International, 17e édition. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, États-Unis.

Baghbani-Arani, A., Jami, M.G., Namdari, A., Karami Borz-Abad, R., 2020. Influence des régimes d'irrigation, de la zéolite et des engrais inorganiques et organiques sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la fertilité du sol et le rendement du tournesol dans un sol sableux. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 51 (6), 711–725. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729791.

Baghodrat, G., Ahmadi, K., Valizadeh, B., Gh, B., 2021. Effet du soufre, de la wollastonite, de la biotite, de la zéolite, du graphite, de la perlite et du feldspath sur la ponte et l'éclosion des œufs du psylle commun du pistachier (Agonoscena pistaciae Burckhardt & Lauterer, Hem.: Psyllidae) en conditions de verger. Pist. Heal. J. 4, 56–60. https://doi.org/10.22123/PHJ.2021.287902.1101.

Bisbis, M.B., Gruda, N., Blanke, M., 2018. Impacts potentiels du changement climatique sur la production maraîchère et la qualité des produits – une revue. J. Clean. Prod. 170, 1602–1620. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.224.

Bonasia, A., Conversa, G., Lazzizera, C., Gambacorta, G., Elia, A., 2010. Caractérisation morphologique et qualitative de la tête d'artichaut issue de nouveaux cultivars multipliés par graines. J. Sci. Food Agric. 90, 2689–2693. https://doi.org/10.1002/jsfa.4141.

Calzarano, F., Seghetti, L., Pagnani, G., Di Marco, S., 2020. Les zéolithes italiennes dans la lutte contre la pourriture grise et la pourriture acide, et leur effet sur la réflectance foliaire, le raisin et le vin.
Agriculture 10, 1–10. https://doi.org/10.3390/agriculture10120580.

Cammarano, D., Ronga, D., Di Mola, I., Mori, M., Parisi, M., 2020. Impact du changement climatique sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'azote chez la tomate de transformation cultivée en Italie. Agric. Water Manag. 241, 106336 https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106336.

Chatzistathis, T., Papaioannou, E., Giannakoula, A., Papadakis, I.E., 2021. La zéolite et la vermiculite, en tant qu'amendements inorganiques du sol, modifient la répartition entre la partie aérienne et les racines, la nutrition minérale, l'activité du photosystème II et les paramètres d'échange gazeux des châtaigniers (Castanea sativa Mill). Agronomy 11. https://doi.org/10.3390/agronomy11010109.

Constantinescu-Aruxandei, D., Lupu, C., Oancea, F., 2020. Les nanomatériaux siliceux naturels en tant que produits biorationnels : agents phytoprotecteurs et renforçateurs de la santé des plantes. Agronomy 10. https://doi.org/10.3390/agronomy10111791.

Conversa, G., Elia, A., 2019. Croissance, concentration critique en azote et besoins en azote des cultures de laitue pommée et de laitue romaine cultivées dans des conditions méditerranéennes. Agronomy
9. https://doi.org/10.3390/agronomy9110681.

Conversa, G., Lazzizera, C., Bonasia, A., Elia, A., 2013. Rendement et absorption de phosphore d'une culture de tomates de transformation cultivées à différents niveaux de phosphore dans un sol calcaire, sous l'influence d'une inoculation mycorhizienne en conditions de plein champ. Biol. Fertil. Soils 49, 691–703. https://doi.org/10.1007/s00374-012-0757-3.

Conversa, G., Bonasia, A., Di Gioia, F., Elia, A., 2015. Un système d'aide à la décision (GesCoN) pour la gestion de la fertirrigation dans les cultures maraîchères. Partie II – étalonnage et validation du modèle dans différentes conditions environnementales de culture sur des tomates cultivées en plein champ. Front. Plant Sci. 6, 495 tps://doi.org/10.3389/fpls.2015.00495.

Conversa, G., Lazzizera, C., Bonasia, A., Elia, A., 2019. Croissance, absorption d'azote et courbe de dilution critique de l'azote chez des cultivars de brocoli cultivés dans des conditions méditerranéennes. Sci.
Hortic. 244, 109–121. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.034.

De Smedt, C., Someus, E., Spanoghe, P., 2015. Utilisations potentielles et réelles des zéolites dans la protection des cultures. Pest Manag. Sci. 71, 1355–1367. https://doi.org/10.1002/ps.3999.

De Smedt, C., Van Damme, V., De Clercq, P., Spanoghe, P., 2016. Effet insecticide des zéolites sur la mineuse de la tomate Tuta absoluta (Lepidoptera : Gelechiidae). Insects 7. https://doi.org/10.3390/insects7040072.

De Smedt, C., Steppe, K., Spanoghe, P., 2017. Effets bénéfiques des zéolites sur la photosynthèse des plantes. Adv. Mater. Sci. 2 (1), 11. https://doi.org/10.15761/ams.1000115.

Elia, A., Conversa, G., 2012. Réponses agronomiques et physiologiques d'une culture de tomates à l'apport d'azote. Eur. J. Agron. 40, 64–74. https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.02.001.

Elia, A., Conversa, G., 2015. Un système d'aide à la décision (GesCoN) pour la gestion de la fertirrigation dans les cultures maraîchères en plein champ. Partie I – approche méthodologique et description du logiciel. Front. Plant Sci. 6, 319. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00319.

Elia, A., La Rotonda, P., Lazzizera, C., Conversa, G., 2021. Validation de la nouvelle modélisation des relations hydriques du sol et de la dynamique de l'azote dans le sol du système d'aide à la décision GesCoN : une nouvelle version. Acta Hortic. 1311, 469–476. https://doi.org/10.17660/ ActaHortic.2021.1311.60.

Eroglu, N., Emekci, M., Athanassiou, C.G., 2017. Applications des zéolites naturelles dans l'agriculture et la production alimentaire. J. Sci. Food Agric. 97, 3487–3499. https://doi.org/ 10.1002/jsfa.8312.

de Freitas, S.T., Shackel, K.A., Mitchamet, E.J., 2011. L'acide abscissique déclenche des mécanismes à l'échelle de la plante entière et spécifiques au fruit pour augmenter l'absorption de calcium par le fruit et prévenir le développement de la pourriture apicale chez la tomate, 2645-56 J. Exp. Bot. 62 (8). https://doi.org/ 10.1093/jxb/erq430.

Gallardo, M., Elia, A., Thompson, R.B., 2020. Systèmes d'aide à la décision et modèles pour faciliter la gestion de l'irrigation et des nutriments des cultures maraîchères. Agric. Water Manag. 240 (2020), 106209 https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106209.

Ghannad, M., Ashraf, S., Alipour, Z.T., 2014. Amélioration du rendement et de la qualité des tubercules de pomme de terre (Solanum tuberosum L.) grâce à une gestion intégrée des engrais. Int. J. Agric. Crop Sci. 7, 742–748.

Huwei, S., Asghari, M., Zahedipour-Sheshglani, P., Alizadeh, M., 2021. Modélisation et optimisation des changements dans les propriétés physiques et biochimiques des raisins de table en réponse à un traitement à la zéolite naturelle. LWT 141, 110854. https://doi.org/10.1016/j. lwt.2021.110854.

ISTAT, 2022. Système d'information électronique sur l'agriculture et l'élevage. Institut national italien de statistique (ISTAT), Rome. Disponible en ligne : http:// agri.istat.it/. Consulté le 10 mars 2023.

Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K., Mierzwa-Hersztek, M., 2022. L'utilisation des zéolites comme additifs aux engrais – une revue. Catena 213. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106125.

Laane, H.M., 2018. Les effets des pulvérisations foliaires à base de différents composés de silicium. Plants 7. https://doi.org/10.3390/plants7020045.

Ma, J.F., Yamaji, N., 2006. Absorption et accumulation du silicium chez les plantes supérieures. Trends Plant Sci. 11, 392–397. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007.

Marcelis, L.F.M., Heuvelink, E., Goudriaan, J., 1998. Modélisation de la production de biomasse et Rendement des cultures horticoles : une revue. Sci. Hortic. 74, 3–111. https://doi.org/ 10.1016/S0304-4238(98)00083-1.

Mir, R.A., Bhat, B.A., Yousuf, H., Islam, S.T., Raza, A., Rizvi, M.A., Charagh, S., Albaqami, M., Sofi, P.A., Zargar, S.M., 2022. Rôle multidimensionnel du silicium dans l'activation d'une croissance végétale résiliente et l'atténuation du stress abiotique. Front. Plant Sci. 13, 819658 https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658.

Moale, C., Ghiurea, M., Sîrbu, C.E., Somoghi, R., Cioroianu, T.M., Faraon, V.A., et al., 2021. Effets des nanomatériaux naturels siliceux appliqués en association avec des engrais foliaires sur la physiologie, le rendement et la qualité des fruits des abricotiers et des pêchers. Plants 10. https://doi.org/10.3390/plants10112395.

Noori, M., Zendehdel, M., Ahmadi, A., 2006. Utilisation de zéolites naturelles pour améliorer la salinité des sols et le rendement des cultures. Toxicol. Environ. Chem. 88 (1), 77–84 https://doi.org/10.1080/02772240500457928.

Ramesh, K., Reddy, D.D., 2011. Les zéolites et leurs utilisations potentielles en agriculture. Adv. Agron. 113, 219–241 doi 10.1016/B978-0-12-386473-4.00004-X.

Reha´kova´, M., C˘uvanov´a, S., Dziv´ak, M., Rim´ar, J., Gaval'Ov´a, Z., 2004. Utilisations agricoles et agrochimiques de la zéolite naturelle de type clinoptilolite. Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 8, 397–404. https://doi.org/10.1016/j.cossms.2005.04.004

Rotondi, A., Morrone, L., Facini, O., Faccini, B., Ferretti, G., Coltorti, M., 2021. Impacts distincts des films de particules sur les propriétés optiques des feuilles d'olivier et la physiologie végétale. Foods 10. https://doi.org/10.3390/foods10061291.

Sedaghat, M., Hazrati, S., Omrani, M., 2022. Utilisation de la zéolite et de l'acide salicylique comme stratégie d'adaptation à la sécheresse chez les plants de blé. South Afr. J. Bot. 146, 111–117. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.10.001.

Tsintskaladze, G., Eprikashvili, L., Mumladze, N., Gabunia, V., Sharashenidze, T., Zautashvili, M., Kordzakhia, T., Shatakishvili, T., 2017. Nanomatériau zéolitique azoté et possibilité de son application en agriculture. Ann. Agrar. Sci. 15 (3), 365–369. https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.07.006.

Valentini, G., Pastore, C., Allegro, G., Muzzi, E., Seghetti, L., Filippetti, I., 2021. Application de kaolin et de zéolite naturelle italienne riche en chabasite pour atténuer l'effet du réchauffement climatique sur Vitis vinifera l. Cv. Sangiovese. Agronomy 11. https://doi.org/ 10.3390/agronomy11061035.

World Processing Tomato Council, 2020. Mise à jour des récoltes du WPTC et estimation de la production mondiale au 22 octobre 2020. Disponible en ligne à l'adresse : 〈 https://www.tomatonews. com/en/wptc-preliminary-2020-global-crop-estimate-_2_1175.html〉 . (Vérifié le février 2023).

Zheng, J., Chen, T., Wu, Q., Yu, J., Chen, W., Chen, Y., et al., 2018. Effet de l'application de zéolite sur la phénologie, le rendement en grains et la qualité des grains du riz soumis à un stress hydrique. Agric. Water Manag. 206, 241–251. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.008.