



Article

Isolement de divers solubilisants de phosphate et de zinc Microorganismes de différents environnements

Samira Islas-Valdez 1,2,†, Antisar Afkairin 1,†, Benjamin Rovner¹ et Jorge M. Vivanco 1,*

¹ Département d'horticulture et d'architecture paysagère, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, États-Unis ; lij15@txstate.edu (SI-V.); antisar.afkairin@colostate.edu (AA); ben.rovner@colostate.edu (BR)

² Département des sciences agricoles, Texas State University, San Marcos, TX 78666, États-Unis

* Correspondance : j.vivanco@colostate.edu ; Tél. : +1-970-491-7170 ; Télécopieur : 970-491-4895

† Ces auteurs ont participé à ce travail à part égale.

Résumé : Cette étude aborde le défi de trouver de nouvelles façons de solubiliser le phosphore et le zinc à des fins agricoles. L'objectif était d'isoler les PSM (microbes solubilisant le phosphore) et les ZnSM (microbes solubilisant le zinc) de différents environnements (par exemple, amendements du sol, utilisations des terres et systèmes de rotation des cultures) et d'évaluer leur capacité à solubiliser différentes sources de P insoluble (par exemple, Phosphate β -tricalcique (β -TCP), phytate de calcium (CaP) et phosphate naturel (RP)) et sources de Zn (par exemple, carbonate de zinc (ZnC), oxyde de zinc (ZnO) et phosphate de zinc (ZnP)). Ici, 25 isolats capables de solubiliser des sources de P ou de Zn ont été isolés et classés par espèce à l'aide du séquençage de l'ARNr 16S et de la région ITS. Notamment, *Aspergillus awamori*, *Fusarium circinatum*, *Fusarium longifundum* et *Mucor circinelloides*, isolés des sols cultivés et des amendements du sol, sont apparus comme les PSM et les ZnSM les plus efficaces. *Mucor circinelloides* a présenté la capacité de solubilisation la plus élevée pour les bouillons contenant du β -TCP, du CaP, du RP, du ZnO et du ZnP, avec des changements log₂ de 3,7, 1,8, 8,9, 7,8 et 2,4, respectivement, par rapport au témoin. Pour le ZnC et le ZnO, *Aspergillus awamori* a présenté la solubilisation de Zn la plus élevée, avec un changement de 2,1 et 3,0 log₂. L'étude met en évidence le potentiel de ces souches en tant que biofertilisants et souligne le rôle des genres *Mucor* et *Fusarium* dans la s

Mots-clés : Microorganismes solubilisant le P; Microorganismes solubilisant le zinc ; amendements du sol; sols cultivés; bactéries; champignons



Citation : Islas-Valdez, S. ; Afkairin, A. ; Rovner, B. ; Vivanco, JM Isolation de divers micro-organismes solubilisant les phosphates et le zinc provenant de différents environnements. Appl. Microbiol. 2024, 4, 1042-1056.

<https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4030071>

Rédactrice académique : Elena Tamburini

Reçu : 7 juin 2024

Révisé : 2 juillet 2024

Accepté : 4 juillet 2024

Publié : 7 juillet 2024



Copyright : © 2024 par les auteurs.
Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et

conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Le phosphore (P) et le zinc (Zn) sont des nutriments essentiels nécessaires au développement des plantes, au rendement des cultures et à la qualité des grains [1]. Pourtant, plus de 30 % des sols cultivés dans le monde sont alcalins et présentent une teneur élevée en carbonate de calcium, ce qui entrave l'absorption des nutriments [2-4]. Bien que les engrais P et Zn comblerent ces carences, > 80 % des applications aboutissent à des nutriments peu solubles en raison de la formation de formes insolubles de P et Zn [5,6]. Ceux-ci incluent le phosphate tricalcique (TCP) et le phytate de calcium (CaP) pour le P [5,7] et pour les composés de Zn tels que la smithsonite (ZnC, carbonate de zinc), la zincite (ZnO, oxyde de zinc) et l'espoir (ZnP, zinc) . phosphate [3]. Ces composés insolubles sont connus sous le nom d'héritage de P et de Zn dans le sol [8-14].

Le phosphate naturel (RP), limité et inégalement réparti, pourrait entraîner une nouvelle augmentation des prix des engrais phosphatés [15,16]. De plus, plus de 50 % des sols cultivés en céréales dans le monde sont déficients en Zn disponible pour les plantes [2,4,5], affectant 30 % de la population mondiale [17,18].

Les efforts visant à remédier à la carence en Zn grâce à la biofortification agronomique des céréales (par exemple, le blé et le maïs) sont confrontés à des défis en raison des coûts élevés des engrais au Zn [2,4].

L'utilisation de micro-organismes solubilisant le P et le Zn (PSM et ZnSM) constitue une stratégie écologique et rentable pour recycler les nutriments P et Zn existants dans le sol. Ce groupe diversifié comprend diverses bactéries (par exemple *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter* et *Burkholderia*) et champignons (par exemple *Penicillium*, *Fusarium* et *Aspergillus*) [5,19]. Un problème primordial dans la MSP

l'isolement est l'utilisation conventionnelle du phosphate bêta-tricalcique (β -TCP) comme seule source de P pour identifier les PSM [20,21]. Cette méthode est débattue car le phosphate bêta-tricalcique ne représente pas avec précision les formes diverses et complexes de phosphore indisponible trouvées dans les sols naturels, ce qui peut entraîner des écarts et des surestimations de l'efficacité du PSM dans des conditions de laboratoire par rapport aux conditions de terrain. Ainsi, il est recommandé d'utiliser une combinaison de sources de phosphore insolubles, telles que la phytine, le phosphate naturel (RP) et le phosphate de zinc (ZnP), pour l'isolement des micro-organismes solubilisant le phosphate (PSM) [22,23]. En effet, le recours à une source unique, comme le phosphate tricalcique (TCP), a montré ses limites, car de nombreuses souches sélectionnées de cette manière sont inefficaces sur d'autres composés de phosphore insolubles et dans les conditions agricoles. L'utilisation de plusieurs sources de P indisponibles augmente la probabilité d'isoler une gamme diversifiée et efficace de PSM, mieux adaptés aux différentes conditions du sol [24-26]. De plus, bien que les approches à inoculum unique intégrant les PSM et les ZnSM aient été largement étudiées, ces approches ne testent généralement qu'un seul type de source insoluble de P et de Zn [27-30]. Des informations limitées sont disponibles sur les consortiums PSM et ZnSM, qui ont également été testés, bien qu'avec une seule source insoluble de P et de Zn [31]. Par conséquent, l'utilisation de consortiums PSM et ZnSM ou de souches uniques capables de solubiliser plusieurs sources insolubles de P et de Zn peut s'avérer être une stratégie plus efficace pour remédier aux carences en P et Zn dans des conditions agricoles [31].

Comprendre la densité de population des micro-organismes solubilisant le P et le Zn (PSM et ZnSM) dans différents environnements est crucial pour le dépistage efficace de ces microbes. Par exemple, il a été démontré que les pratiques de gestion des sols, y compris l'application d'amendements du sol, les cultures intercalaires ou la rotation des cultures, augmentent la diversité et l'abondance des PSM et du ZnSM [32,33]. Li et coll. [34] ont rapporté que les PSM et les ZnSM sont plus densément peuplés dans la rhizosphère, les sols en vrac, le compost et les racines des plantes que dans les sédiments ou les plans d'eau. L'utilisation des terres joue également un rôle, les sols non cultivés (par exemple les sols forestiers) abritant une plus riche diversité de microbes que les sols agricoles, les prairies et les mines [20,34].

À l'inverse, Fernández et al. [35] ont rapporté que la structure de la communauté PSM était 81 % plus élevée dans les sols cultivés que dans les sols naturels (par exemple, les prairies), et ont noté des différences entre les sols cultivés distincts. Cette différence était particulièrement prononcée dans les sols cultivés en systèmes de rotation des cultures (légumineuses-blé) par rapport aux systèmes de monoculture [3]. Contrairement aux engrais chimiques qui peuvent avoir un impact négatif sur la santé des sols, les engrais à base de déchets tels que le lombricompost et le compost gagnent en popularité [36]. Ces engrais à base de déchets sont connus pour leur riche diversité microbienne, y compris des genres capables de solubiliser le P et le Zn [37-39]. Par conséquent, la présente recherche a émis l'hypothèse que le dépistage des microbes provenant de différents environnements faciliterait la sélection des PSM et des ZnSM d'élite.

La présente étude présente une nouvelle approche pour l'isolement des PSM et des ZnSM.

Pour y parvenir, nos objectifs étaient (1) d'isoler les PSM et les ZnSM de différents environnements, y compris ceux avec des utilisations des terres, des systèmes de rotation des cultures et des amendements du sol différents, et (2) de sélectionner quantitativement et qualitativement les PSM et les ZnSM capables de solubiliser différentes sources de P peu solubles (c'est-à-dire TCP, CaP et RP) et sources de Zn (c'est-à-dire ZnC, ZnO et ZnP). Ces microbes bénéfiques pourraient être utilisés dans la biofertilisation agricole.

2. Matériels et méthodes

2.1. Collecte d'échantillons de sol et amendements du sol

En mai 2023, des échantillons de terre végétale (5 à 15 cm de profondeur) ont été collectés auprès du Centre de recherche, de développement et d'éducation agricole (ARDEC) de l'Université d'État du Colorado à Fort Collins, Colorado (40° 36' 36,9" N et 104° 59' 38,2" O). Selon la Base mondiale de référence pour les ressources en sols (WRB), les sols forestiers (FS) sont classés comme luvisol, sols agricoles, y compris les sols de blé et d'orge (WBS), les sols de maïs et de sorgho (CSS) et les sols de haricots pinto et de niébé (PCS), sont classés comme des chernozems. Ces échantillons ont été obtenus à partir de sols agricoles soumis à différents systèmes de rotation des cultures, notamment blé-orge (WBS), maïs-sorgho (CSS) et haricot pinto-niébé (PCS). De plus, des échantillons de terre végétale (de 5 à 15 cm de profondeur) ont été prélevés dans un sol forestier non cultivé (FS) à Poudre Canyon, situé à Greyrock Mountain à Fort Collins, Colorado. Un seul échantillon composite de chaque site (c'est-à-dire agr

et sols incultes) a été obtenu à partir de six échantillons prélevés au hasard et puis homogénéisé. L'étude comprenait également une enquête sur deux amendements du sol : engrais organique pur pour la coulée de vers (WSA, UNCO Industries, Inc., Union Grove, WI, USA) et du compost pro de mouton et de tourbe (CSA, Permagreen Organics, Co., Arvada, CO, USA), tous deux achetés auprès de fournisseurs commerciaux. Tous les échantillons collectés ont été conservés à 4 °C jusqu'à une analyse biologique plus approfondie pour évaluer leur impact sur l'isolement des potentiels PSM et ZnSM, en tenant compte de diverses pratiques de gestion des sols. Le physico-chimique la caractérisation des échantillons de sol et des amendements du sol (tableau 1) a été réalisée en utilisant les méthodes suivantes : un rapport sol/eau de 1:1 pour la mesure du pH, le DTPA-extractible Méthode Zn pour l'analyse du zinc, méthode de perte au feu pour la détermination de la matière organique, et la méthode Menlich 3 pour tester le phosphore. Ces analyses ont été réalisées par Ward Laboratories, Inc. (Kearney, NE, États-Unis). La conversion du phosphore sous une forme accessible aux plantes est fortement influencée par les propriétés du sol, notamment le pH et la teneur en fer. Certains facteurs affectent la disponibilité du phosphore en formant des complexes solubles ou insolubles. Pour l'isolement de micro-organismes solubilisant le phosphore (PSM) efficaces, il est essentiel de choisissez des substrats qui imitent fidèlement ces conditions naturelles du sol. Cette approche garantit que les micro-organismes isolés sont non seulement efficaces dans des conditions de laboratoire, mais sont également capables d'améliorer la disponibilité du phosphore dans divers contextes agricoles. Ainsi, notre sélection de substrat a été guidée par ces considérations pour optimiser les l'applicabilité des MSP isolés.

Tableau 1. Propriétés physicochimiques des environnements choisis pour isoler les PSM et les ZnSM.

Paramètres	FS	CSS	PCS	WBS	CSA	WSA
pH du sol	7.1	8.3	8.6	8.4	8.9	7.2
P disponible (mg kg ⁻¹)	15	91	73	65	1746	786
Zn disponible (mg kg ⁻¹)	1,62	1,46	1,83	1,36	133,5	119,9
Matière organique (%)	4.3	2.7	2.6	3.0	19.2	43,5

FS : sol forestier ; CCS : maïs-sol de maïs ; PCS : haricot pinto-niébé ; WBS : sol blé-orger ; CSA : amendement du sol par compostage ; WSA : amendement du sol par vers de terre.

2.2. Présélection et isolement des PSM et des ZnSM

Pour l'isolement des PSM et ZnSM en mai 2023, 1 g de chaque sol ou amendement L'échantillon a été homogénéisé dans 9 ml de solution saline stérile à 0,85 %, suivi d'une série de 10 fois. dilution (10⁻¹ à 10⁻¹⁰) par une méthode modifiée [40]. Les suspensions qui en ont résulté ont été étalé en triple sur Plate Count Agar (PCA, EM Industries, Inc., Darmstadt, Allemagne) et incubé à 30 °C pendant une nuit pour identifier la dilution à partir de laquelle il a été possible de compter les unités formant colonies (UFC) pour des études ultérieures.

Pour les PSM, une aliquote de 100 ml de la dilution en série avec le nombre de colonies viables de chaque la suspension a été répandue sur le Phosphate de l'Institut National de Recherche Botanique (NBRIP) gélose moyenne [41] complétée par du phosphate β -tricalcique (β -TCP) (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, États-Unis), du phytate de calcium (CaP) (TCI America, Portland, OR, États-Unis) ou de la roche phosphate (RP). Le milieu NBRIP pour RP a été modifié en ajoutant du bleu de bromophénol colorant à la concentration indiquée par Li et al. [42] pour améliorer la visualisation. Après sept jours d'incubation à 30 °C, PSM avec des halos clairs (c'est-à-dire pour le β -TCP et le CaP) ou des halos jaunes (c'est-à-dire pour RP) ont été purifiés par re-strie cinq fois sur des plaques de milieu NBRIP pour obtenir des souches. Les souches purifiées ont été conservées à -80 °C dans un bouillon dextrose de pomme de terre (PDB, Difco Laboratories, Sparks, MD, USA) additionné de 50 % (v/v) de glycérol (Sigma-Aldrich, MO) pour une analyse plus approfondie.

De même, une aliquote de 100 mL de la dilution en série avec le nombre de colonies viables a été évalué pour les ZnSM sur milieu Pikovskaya modifié [41] complété par 0,1% ZnO (Spectrum Chemical MFG, Nouveau-Brunswick, NJ, États-Unis), ZnP (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) ou ZnC (MP Biomedicals, LLC, Solon, OH, USA). Pikovskaya modifié Le milieu est considéré comme le milieu le plus efficace pour cribler les ZnSM (29). Le même La méthode de stockage identique aux PSM a été appliquée aux ZnSM.

2.3. Caractérisation taxonomique des souches isolées

total de 25 isolats présentant une capacité de solubilisation du P ou du Zn ont été obtenus en juin 2023 dans les différents environnements lors de la présélection. Parmi ces isolats, 7 souches bactériennes ont été identifiées par analyse de l'ADNr 16S, tandis que 18 souches fongiques ont été soumises à l'analyse de la séquence génétique de l'ADNr ITS. Pour l'identification bactérienne et fongique, des colonies uniques de chaque souche ont été étalées sur des plaques PDA et incubées à 30 °C pendant la nuit pour obtenir des cultures fraîches. Par la suite, les plaques PDA ont été expédiées pour extraction et analyse de l'ADN à l'aide des services de séquençage de l'ADN Sanger fournis par Azenta Life Sciences-Genewiz, Inc. (South Plainfield, NJ, États-Unis).

2.4. Criblage final des PSM et des ZnSM

procédure expérimentale a suivi de près celle du présélection, à l'exception du fait que seules les souches performantes de manière constante dans différents milieux P et Zn ont été sélectionnées pour une analyse plus approfondie. Sur les 25 souches initiales isolées lors de la présélection, six souches au total ont été retenues pour une analyse plus approfondie. Ces six souches ont subi des tests supplémentaires dans des milieux NBRIP solides et liquides et Pikovskaya modifiés pour identifier celles ayant la capacité de solubiliser deux ou plusieurs sources insolubles de P et de Zn.

L'estimation qualitative de la solubilisation du P et du Zn par les isolats bactériens impliquait l' inoculation de 10 µL de culture bactérienne en phase log (inoculum ajusté à une densité optique (DO) 600 = 0,4 ~ 2,9 × 10⁸ UFC mL⁻¹) au centre du NBRIP et milieu Pikovskaya modifié, suivant les mêmes conditions que dans l'expérience de présélection. Pour l'estimation qualitative de la solubilisation du P et du Zn par les isolats fongiques, un disque de 7 mm a été inoculé au centre du NBRIP et du milieu Pikovskaya modifié. Le NBRIP non inoculé et le milieu Pikovskaya modifié ont servi de contrôles. L'efficacité de solubilisation du P et l'efficacité de solubilisation du Zn ont été calculées par la formule standard décrite par Nguyen et al. [43].

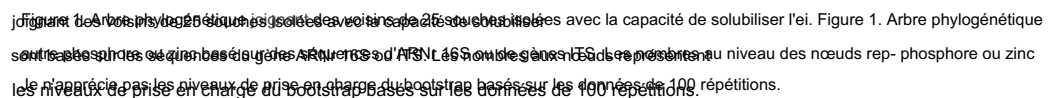
L'estimation quantitative de la solubilisation du P et du Zn par des isolats bactériens impliquait l' inoculation de 10 ml de NBRIP et de bouillon Pikovskaya modifié (c'est-à-dire en remplaçant le β-TCP par des sources de Zn) avec 100 µL de culture bactérienne en phase logarithmique (41). Ces cultures ont été conservées dans un incubateur-agitateur à 200 tr/min pendant sept jours à 30 °C. Pour l'estimation quantitative de la solubilisation du P et du Zn par les isolats de champignons, la méthodologie décrite par Mittal et al. [44] a été menée. En bref, un disque de 7 mm a été inoculé dans 10 ml de NBRIP et de bouillon Pikovskaya modifié. Après incubation, le surnageant a été obtenu par centrifugation à 10 000 tr/min pendant 5 min et filtré sur papier filtre Whatman 1 [44]. Ensuite, la quantité de solubilisation du P a été déterminée à l'aide d'une méthode à l'acide ascorbique modifié à 882 nm [40, 45] et le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre (multimètre HQ40d, Hach, Loveland, CO, USA). La solubilisation du Zn a été analysée par Ward Laboratories, Inc. (Kearney, NE, USA).

2.5. Analyse statistique

arbre phylogénétique a été construit à l'aide du logiciel Mega version 11 via la méthode de jonction de voisins avec 100 répétitions bootstrap. L'arbre phylogénétique a été visualisé à l'aide du package ggtree (46). Les données ont été analysées à l'aide de RStudio Team 2023 version 4.2.3 (PBC, Boston, MA, USA). Une analyse de variance unidirectionnelle (ANOVA) a été réalisée, suivie d'un test HSD de Tukey post-hoc. Les différences ont été considérées comme significatives à $p < 0,05$. Les hypothèses du modèle, y compris l'homogénéité de la variance et la normalité des résidus, ont été évaluées à l'aide du test de Shapiro-Wilk et de l'homoscédasticité à l'aide du test de Levene. Les données ne répondant pas aux hypothèses (c'est-à-dire $p < 0,05$) ont été transformées à l'aide de transformations sqrt ou log. De plus, les corrélations entre les changements de pH et la solubilisation du P ou du Zn dans les bouillons ont été testées avec le coefficient de corrélation de Pearson ($p < 0,05$) pour des ensembles de données normalement distribués. Pour les données non distribuées normalement, les coefficients de corrélation de Spearman ont été calculés.

3.1. Criblage initial des PSM et des ZnSM de différents environnements

1) Les 18 souches restantes ont été identifiées comme étant des champignons du genre *repmomas* (Figure 1). Les 18 souches restantes ont été identifiées comme des champignons, représentant sept genres : *Aspergillus* (2), *Circinella* (1), *Fusarium* (6), *Galactomyces* (1), *Mucor* (2), *Neu-Neucosmospora* (1), *Penicillium* (4) et *Purpureocillium* (1).

[illegible]

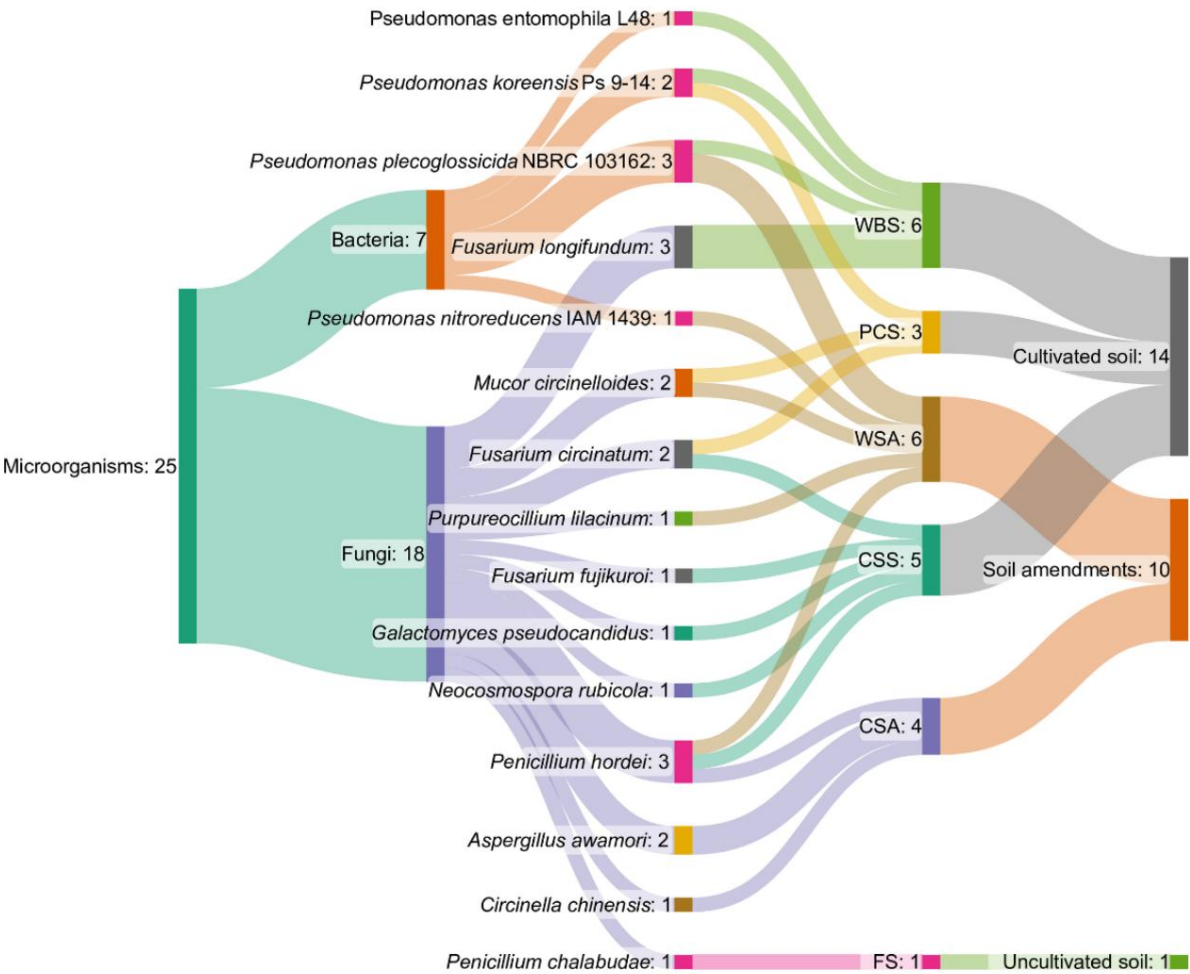


Figure 2. Diagramme de Sankey illustrant les isolats fongiques et bactériens en fonction de leurs environnements. Le diamètre des lignes est proportionnel au nombre de souches uniques ou partagées isolées de chacune des six milieux différents : WBS : sol blé-sorgho, PCS : sol blé-sorgho, WSA : sol blé-sorgho, CSS : sol de maïs-sorgho, CSA : amendement du sol par vers de terre, CSS : sol maïs-sorgho, CSA : amendement du sol compost et FS : sol forestier.

L'analyse phylogénétique a également regroupé deux souches d'*Aspergillus awamori* et deux souches de *Mucor circinelloides* avec un support bootstrap à 100 % (Figure 1). Des valeurs bootstrap similaires étaient

observées pour deux souches de *Fusarium circinatum* et pour trois souches de *Fusarium longifundum*. De plus, trois souches de *Penicillium hordei* formaient également un clade présentant une similarité de 56 %, avec deux d'entre eux formant une sous-clade terminale avec un support bootstrap à 100 %. Dans l'ensemble, le 18 souches fongiques ont été classées en 11 espèces différentes, reflétant leurs associations avec leurs environnements respectifs (Figure 2). Notamment *Aspergillus awamori*, *Purpureocillium lilacinum* et *Circinella chinensis* ont été exclusivement isolés des amendements du sol. Le même, *Fusarium longifundum*, *Fusarium fujikuroi*, *Galactomyces pseudocandidus*, *Neocosmospora rubicola* ont été identifiés uniquement dans les sols cultivés, alors que *Penicillium chalahudae* n'a été identifié que dans les sols cultivés. *Aspergillus awamori*, *Purpureocillium lilacinum* et *Circinella chinensis* ont été exclusivement isolés des amendements du sol. Le même, *Fusarium longifundum*, *Fusarium fujikuroi*, *Galactomyces pseudocandidus*, *Neocosmospora rubicola* ont été identifiés uniquement dans les sols cultivés, alors que *Penicillium chalahudae* n'a été identifié que dans les sols cultivés.

Cette étude met en lumière la prévalence des PSM et des ZnSM dans différents environnements, et *Neocosmospora rubicola* ont été identifiés uniquement dans les sols cultivés, tandis que *Penicillium chalahudae* n'a été identifié que dans les sols cultivés. Parmi les sols cultivés, l'incidence la plus élevée de PSM par rapport aux sols Fusarium circinatum et *Penicillium hordei* ont été isolés des amendements du sol, telles que WBS (43 %) et CSS (36 %), contrairement aux rotations de cultures de légumineuses, comme le PCS (21 %).

Parmi les 15 espèces bactériennes et fongiques, 6 ont démontré la capacité de solubiliser plusieurs sources insolubles de P et/ou de Zn. Cette étude met en lumière la prévalence des PSM et des ZnSM dans différents environnements, indiquant leur présence plus élevée dans les sols cultivés (56 %) et dans les amendements du sol (40 %) par rapport aux sols soumis à des rotations de cultures céréalières, telles que les WBS (43 %) et CSS (36 %), contrairement aux rotations de cultures de légumineuses, telles que PCS (21 %).

Parmi les 15 espèces bactériennes et fongiques, 6 ont démontré la capacité à solubiliser les mltl nslbl P ndr Zn srcs. Ntbl Psdmns lclsscd NBRC 103162

Les six souches présentant une solubilisation de plusieurs sources insolubles de P et/ou de Zn lors du dépistage initial (Figure 3) ont fait l'objet d'une évaluation plus approfondie afin d'évaluer leur capacité à solubiliser toutes les sources insolubles de P et de Zn testées dans le NBRIP et le milieu Pikovskaya modifié.

Appl. Microbiol. 2024

4 analyses sur plaques ont révélé que *Pseudomonas plecoglossicida* NBRC 103162, *Aspergillus awamori* et *Penicillium hordei* solubilisent les trois sources de P insoluble testées avec une efficacité variable (Figure 4). *Penicillium hordei* a montré une grande efficacité dans la solubilisation du RP, tandis que *Pseudomonas plecoglossicida* NBRC a excellé dans la minéralisation du CaP. Les deux souches, ainsi que *Aspergillus awamori*, présentaient une solubilisation similaire du β -TCP. Notamment, *Fusarium longifundum* pourrait être un isolat prometteur pour la solubilisation du RP, même s'il n'a pas réussi à solubiliser les deux autres sources de P insolubles testées.

Sources de Zn.

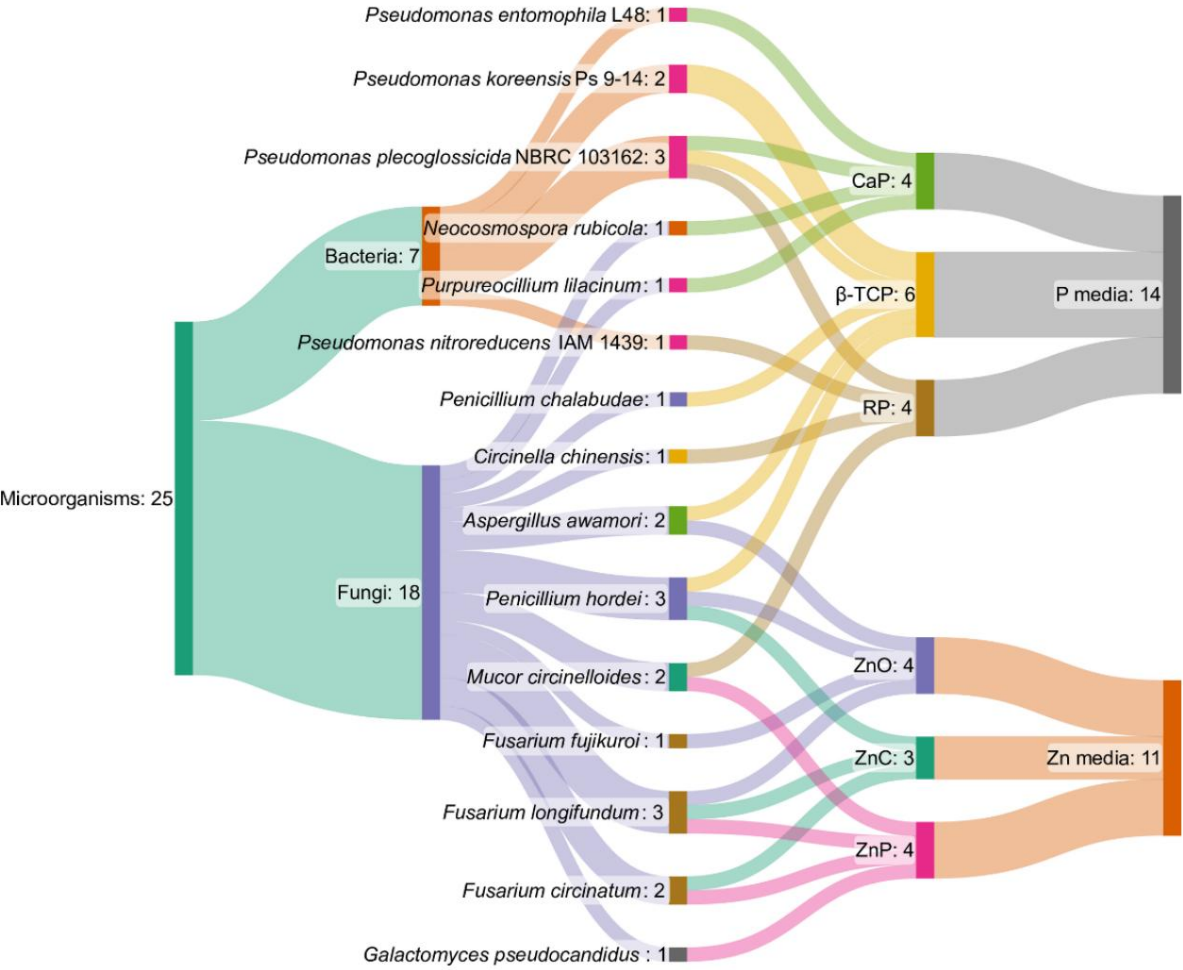


Figure 3. Diagramme de Sankey illustrant le nombre d'isolats fongiques et bactériens sur chaque source de P et de Zn insoluble. Le diagramme illustre la capacité de solubilisation de 25 microorganismes (7 bactéries et 18 champignons) pour solubiliser sept sources de P insolubles (CaP, β -TCP, RP, P media) et quatre sources de Zn insolubles (ZnO, ZnC, ZnP, Zn media). La largeur de chaque lien est proportionnelle au nombre de souches solubilisant une source donnée. Les légendes indiquent les sources de P et de Zn testées.

3.2. Criblage des PSM et des ZnSM avec plusieurs sources de P et de Zn indisponibles

Les six souches présentant une solubilisation de multiples sources insolubles de P et/ou Zn lors de la sélection initiale (Figure 3), ont fait l'objet d'une évaluation plus approfondie pour évaluer leur capacité pour solubiliser toutes les sources insolubles de P et de Zn testées dans NBRIP et Pikovskaya modifié médias. Les analyses sur plaques ont révélé que *Pseudomonas plecoglossicida* NBRC 103162, *Aspergillus awamori* et *Penicillium hordei* ont solubilisé les trois sources de P insoluble testées avec différentes efficacité (Figure 4). *Penicillium hordei* a montré une grande efficacité dans la solubilisation du RP, tandis que *Pseudomonas plecoglossicida* NBRC excellait dans la minéralisation en CaP. Les deux souches, ainsi que *Aspergillus awamori* a présenté une solubilisation similaire du β -TCP. Notamment *Fusarium longifundum* pourrait être un isolat prometteur pour la solubilisation du RP, même s'il n'a pas pu le solubiliser les deux autres ont testé des sources de P insolubles.

4 et la souche inoculée. *Aspergillus awamori*, *Fusarium circinatum*, *Fusarium longifundum*, et *Mucor circinelloides* ont démontré des capacités de solubilisation et de minéralisation significatives dans les bouillons NBRIP contenant du β -TCP, du CaP et du RP par rapport au contrôle (Figure 6). *Mucor circinelloides* a présenté la plus élevée concentration de P solubilisé, la plus élevée dans les bouillons NBRIP contenant du β -TCP, du CaP et du RP par rapport au contrôle (Figure 6). Notamment, *Mucor circinelloides* présentait la concentration de P solubilisé la plus élevée dans les bouillons NBRIP contenant du β -TCP, le CaP et le RP par rapport au témoin avec *Mucor circinelloides* log2 changements de 3,7, 1,0 et 0,2, respectivement. En revanche, *Penicillium hordei* et *Pseudomonas plecoglossicida* NBRIP (103162) ont solubilisé le moins de P dans les bouillons NBRIP contenant du β -TCP, du CaP et du RP, respectivement, par rapport au témoin, confirmant leur capacité limitée à solubiliser différents insolubles Sources P.

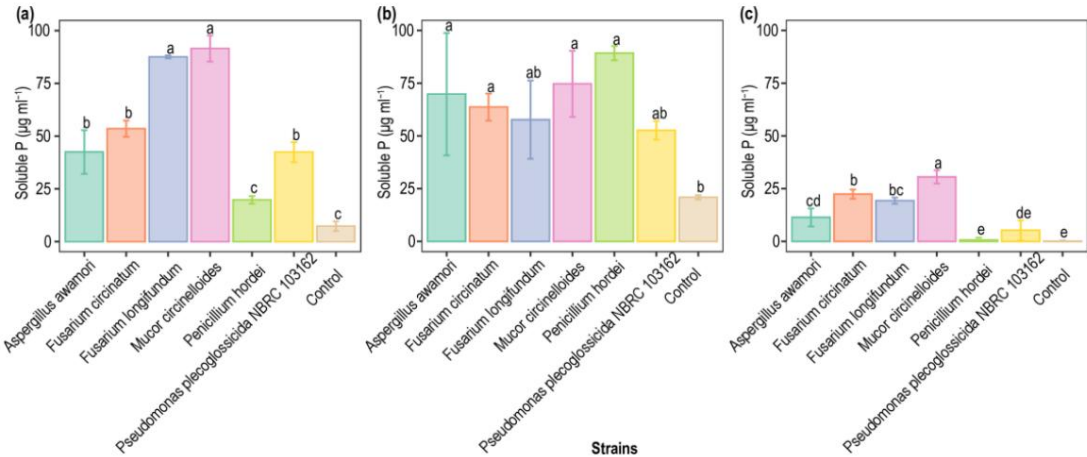


Figure 6. Concentration de P solubilisé pour six souches sélectionnées et le contrôle dans le bouillon NBRIP contenant (a) β -TCP : β -phosphate tricalcique, (b) CaP : phytate de calcium, et (c) RP : phosphate naturel après sept jours d'incubation. Les résultats représentent la valeur moyenne de trois répétitions, avec des barres d'erreur représentant les erreurs standard (n = 3). Les différentes lettres minuscules au-dessus des colonnes indiquent une différence significative (p < 0,05) selon le test ANOVA suivi du test HSD de Tukey.

La solubilisation du P observée a coïncidé avec un déplacement du pH vers la plage acide après sept jours d'incubation (Tableau 2). *Mucor circinelloides* a induit le pH le plus significatif pendant sept jours d'incubation (Tableau 2). *Mucor circinelloides* a induit le pH le plus significatif pendant sept jours d'incubation de facteur log2 pour le β -TCP, le CaP et le RP par rapport au contrôle (-0,5, -0,3 et -1,0 réduction de facteur log2 pour le β -TCP, le CaP et le RP par rapport au contrôle (-0,5, -0,3 et -1,0 log2 fois changements, respectivement). Cette souche présentait la valeur de pH la plus basse ainsi que les concentrations élevées de P soluble, ce qui pourrait suggérer une production d'acide organique et des concentrations ultérieures de P. L'analyse de corrélation a également confirmé cette relation entre le pli dans les bouillons et l'augmentation de la solubilisation du P. Les corrélations négatives étaient la diminution du pH dans les bouillons et l'augmentation de la solubilisation du P. Des corrélations négatives ont été servi pour les bouillons NBRIP contenant du β -TCP (r = -0,71 ; p < 0,001) et RP (r = -0,94 ; p < 0,001) selon le test de corrélation non paramétrique de Spearman. Cependant, a nonsig- p < 0,0001) selon le test de corrélation non paramétrique de Spearman. Cependant, une corrélation non significative (r = -0,38 ; p > 0,05) a été observée pour le CaP selon la corrélation correlative de Pearson (r = -0,38 ; p > 0,05) pour le CaP selon la méthode de Pearson.

Tableau 2. pH moyen du bouillon NBRIP après sept jours d'incubation avec chacune des six souches sélectionnées. Les données représentent la norme moyenne $\pm$ erreur (n = 3). Les différentes lettres dans les mêmes colonnes désignent différence significative (p < 0,05) selon le test ANOVA suivi du test HSD de Tukey.

Souches	β -TCP		Casquette		PR	
	pH	β -TCP	pH	Casquette	pH	PR
Aspergillus awamori	5,30 $\pm$ 0,07 j	pH	6,01 $\pm$ 0,03c	pH	5,11 $\pm$ 0,05c	pH
Fusarium longifundum	5,30 $\pm$ 0,07	5,50 $\pm$ 0,02 c	5,84 $\pm$ 0,03	5,65 $\pm$ 0,12	5,11 $\pm$ 0,05	c
Mucor circinelloides	4,87 $\pm$ 0,03	5,01 $\pm$ 0,02 a	5,78 $\pm$ 0,04	5,84 $\pm$ 0,03	4,65 $\pm$ 0,12	d
Penicillium hordei	5,88 $\pm$ 0,08	5,88 $\pm$ 0,08 b	5,51 $\pm$ 0,08e	5,78 $\pm$ 0,04	4,52 $\pm$ 0,16	d
Pseudomonas plecoglossicida NBRIP				5,51 $\pm$ 0,08	3,69 $\pm$ 0,13b	e
				6,27 $\pm$ 0,09b	6,27 $\pm$ 0,09	
103162		5,14 $\pm$ 0,02 d		5,83 $\pm$ 0,02 d	5,09 $\pm$ 0,01	c
Contrôle		6,77 $\pm$ 0,14 un		6,75 $\pm$ 0,07 un	7,53 $\pm$ 0,16 un	un

Pseudomonas plecoglossicida NBRC 103162	5,14 ± 0,02 jours	5,83 ± 0,02 j	5,09 ± 0,01 c
Appl. Microbiol. 2024, 4			
Contrôle	6,77 ± 0,14 une	6,75 ± 0,07 une	7,53 ± 0,16 une

Parmi les six souches évaluées pour leur capacité à solubiliser tout le Zn insoluble testé Parmi les six sources, *Aspergillus awamori*, *Fusarium circinatum* et *Fusarium longifundum* démontrées sources, *Aspergillus awamori*, *Fusarium circinatum* et *Fusarium longifundum* démontrées sources, *Aspergillus awamori* a affiché la solubilisation de ZnC et de ZnO la plus élevée par rapport au contrôle, présentant une solubilisation de ZnC et de ZnO la plus élevée par rapport au contrôle, présentant un 2,1 log2, respectivement. Pendant ce temps, *Mucor circinelloides* a présenté respectivement un changement de 3,0 log2. Pendant ce temps, *Mucor circinelloides* présentait la plus haute capacité la plus élevée à solubiliser le Zn dans des bouillons contenant du ZnO et du ZnP par rapport au contrôle, avec des changements log2 fois de 7,8 et 2,4, respectivement. Notamment, *Penicillium hordei* et *Pseudomonas plecoglossicida* NBRC 103162 n'ont pas pu solubiliser plus de Zn que le contrôle.

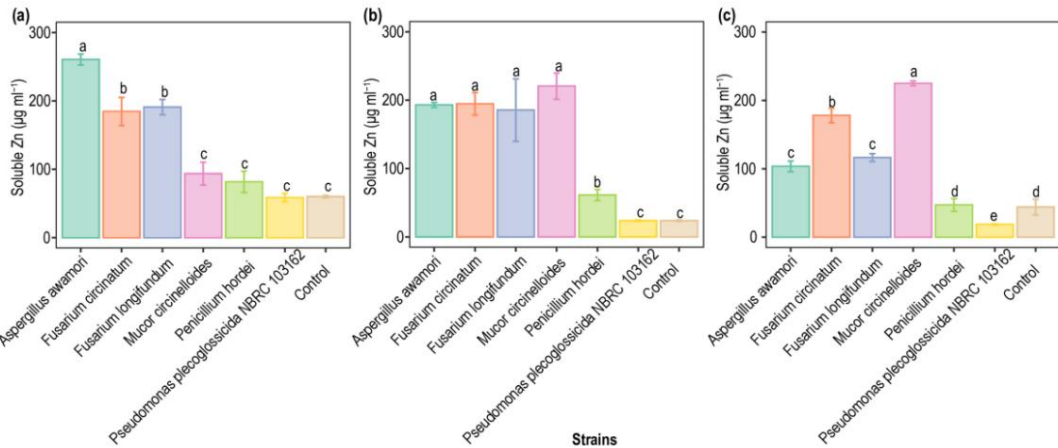


Figure 7. Concentration de Zn solubilisé pour les six souches sélectionnées et le contrôle en milieu modifié contenant (a) ZnC : carbonate de Zn, (b) ZnO : oxyde de Zn et (c) ZnP : phosphate de Zn. Les résultats sont représentés par des barres colorées avec des lettres indiquant des différences significatives (p < 0,05) selon le test ANOVA suivi du test HSD de Tukey. Les données pour ZnO ont été normalisées par journal logarithmiques avant l'analyse ANOVA.

La solubilisation du Zn s'est accompagnée d'un changement notable du pH vers la plage acide après sept jours d'incubation (Tableau 3). *Mucor circinelloides* a induit le plus de signal. La solubilisation du Zn s'est accompagnée d'un changement notable du pH vers le pH acide. diminution significative du pH pour ZnO et ZnP par rapport au contrôle (plage de -0,1 et -0,7 log2 après sept jours d'incubation (Tableau 3)). *Mucor circinelloides* a induit le plus changements, respectivement). De même, *Aspergillus awamori* a montré la plus grande réduction du pH, diminution significative du pH pour ZnO et ZnP par rapport au témoin (-0,1 et -0,7 log2 fois par rapport au traitement témoin (changement de -0,1 log2). Ces souches ont présenté les changements, respectivement). De même, *Aspergillus awamori* a montré la plus grande réduction du pH concentration la plus élevée de Zn soluble ainsi que la valeur de pH la plus basse, ce qui pourrait suggérer une comparaison avec le traitement témoin (changement de -0,1 log2). Ces souches présentaient le production d'acide organique et acidification ultérieure des milieux. L'analyse de corrélation révèle en outre la concentration la plus élevée de Zn soluble ainsi que la valeur de pH la plus basse, ce qui pourrait suggérer d'acide organique et l'acidification ultérieure du milieu. Analyse de corrélation plus approfondie de Zn soluble, montrant des corrélations négatives pour les bouillons Pikovskaya modifiés contenant - a soutenu la relation inverse entre la diminution du pH dans les bouillons et la quantité ing ZnC (r = -0,65 ; p = 0,01), ZnO (r = -0,60 ; p < 0,01) et ZnP (r = -0,93 ; p < 0,0001) selon le Zn soluble, au test de corrélation non paramétrique de Spearman. ZnC (r = -0,65 ; p = 0,01), ZnO (r = -0,60 ; p < 0,01) et ZnP (r = -0,93 ; p < 0,0001) selon au test de corrélation non paramétrique de Spearman.

Tableau 3. pH moyen du bouillon Pikovskaya modifié après sept jours d'incubation avec chacune des six souches sélectionnées. Les données représentent la norme moyenne ± erreur (n = 3). Les différentes lettres dans les mêmes colonnes dénotent une différence significative (p < 0,05) selon le test ANOVA suivi du test de Tukey.

Souches	pH		pH	
	ZnC		ZnO	
	pH	pH	pH	pH
<i>Aspergillus awamori</i>	6,77 ± 0,02b		6,73 ± 0,07 cd	5,11 ± 0,06 c
<i>Fusarium circinatum</i>	7,16 ± 0,14	7,06 ± 0,03 b	7,01 ± 0,09 d	4,71 ± 0,11 5,00
<i>Fusarium longifundum</i>	7,18 ± 0,04	7,18 ± 0,05	7,18 ± 0,05	4,40 ± 0,06 c
<i>Mucor circinelloides</i>	7,18 ± 0,05	7,18 ± 0,05	7,18 ± 0,05	0,01b
<i>Penicillium hordei</i>	7,26 ± 0,04	7,26 ± 0,04	7,26 ± 0,04	5,96 ± 0,09
<i>Pseudomonas plecoglossicida</i> NBRC 103162	7,22 ± 0,06	7,22 ± 0,06	7,22 ± 0,06	6,74 ± 0,06
Contrôle	7,29 ± 0,05	7,29 ± 0,05	7,29 ± 0,05	6,94 ± 0,09

4. Discussion

Compte tenu de la diversité des compositions chimiques des sols, l'utilisation du β -TCP comme source universelle de P insoluble pour isoler les PSM n'est pas fiable [24]. Par conséquent, différentes sources de P insolubles (β -TCP, CaP et RP) ou sources de Zn (ZnC, ZnO et ZnP) ont été utilisées pour isoler 25 souches bactériennes et fongiques ayant des capacités de solubilisation du P ou du Zn lors du criblage initial dans médias. Parmi les 25 souches microbiennes isolées, 6 souches des genres *Aspergillus*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium* et *Pseudomonas* se sont révélées posséder la capacité de solubiliser plusieurs sources insolubles de P et/ou de Zn dans les milieux. Ces résultats concordent avec les études antérieures qui ont révélé que les microbes appartenant aux genres *Aspergillus*, *Penicillium* et *Pseudomonas* étaient les PSM et les ZnSM dominants dans les sols agricoles (32-34, 44, 47-52).

Afin d'établir un processus efficace de sélection des PSM et des ZnSM, les six espèces issues du criblage initial ont été testées sur toutes les sources insolubles de P et de Zn dans différentes conditions. Des différences ont été constatées entre les milieux et les bouillons. Par exemple, alors que *Mucor circinelloides*, *Fusarium circinatum* et *Fusarium longifundum* ne présentaient aucun halo pour toutes les sources de P insolubles dans les milieux, ils étaient capables de solubiliser toutes les sources de P insolubles dans les bouillons. *Pseudomonas plecoglossicida* a montré des halos pour toutes les sources de P insolubles dans les milieux, mais n'a solubilisé que le β -TCP dans les bouillons. Cela concorde avec les rapports précédents selon lesquels le genre *Pseudomonas* présente une solubilisation et une minéralisation médiocres du P [53].

Des tendances similaires ont été observées pour les milieux Zn. *Pseudomonas plecoglossicida* NBRC 103162 présentait un halo dans les milieux mais aucune solubilisation de Zn dans les bouillons. En revanche, *Aspergillus awamori* a présenté le pourcentage le plus élevé d'efficacité de solubilisation du Zn dans les milieux contenant du ZnC, similaire à sa capacité à solubiliser la plus grande quantité de Zn dans un bouillon avec la même source insoluble. Des résultats similaires ont été trouvés pour *Mucor circinelloides* dans des milieux et des bouillons contenant du ZnP. Cependant, cette tendance n'a pas été observée pour les milieux ou bouillons contenant du ZnO. Conformément à ces résultats, d'autres chercheurs ont signalé une faible corrélation entre les milieux et les bouillons pour les PSM en raison des variations des taux de diffusion des différents acides organiques sécrétés sur les milieux (24, 47).

Les bouillons contenant des PSM et des ZnSM ont révélé une relation inverse entre le P ou le Zn soluble et le pH. Cette tendance était particulièrement évidente chez *Aspergillus awamori* et *Mucor circinelloides*, soulignant le rôle potentiel de la production d'acide organique dans la solubilisation du P et du Zn, comme rapporté précédemment par d'autres auteurs (24, 47, 49, 54). Même si les champignons produisent plus d'acides organiques que les bactéries [49,53], le type et la quantité d'acides organiques produits peuvent varier en fonction du temps et de la température d'incubation, ainsi que de la source insoluble [47,55]. Cela pourrait potentiellement expliquer pourquoi les champignons ont montré une plus grande capacité à solubiliser le P et le Zn par rapport aux bactéries étudiées dans cette étude, ainsi que les différences de capacités de solubilisation entre les isolats. Ce résultat est cohérent avec d'autres études dans lesquelles les champignons ont démontré une plus grande efficacité dans la solubilisation des sources insolubles de P, telles que le β -TCP et le RP [56] et les sources de Zn, notamment le ZnO, le ZnP et le sulfate de Zn [29], par rapport aux bactéries. Pour *Aspergillus awamori*, *Fusarium circinatum*, *Fusarium longifundum* et *Mucor circinelloides*, qui ont également montré la capacité de minéraliser des sources de P organiques insolubles, cette capacité pourrait être attribuée à des enzymes telles que les phosphatases et les phytases (24, 47, 53). Bien que certaines études aient également rapporté la capacité des genres *Mucor* et *Fusarium* à solubiliser le P [47, 55, 57–60], il n'existe aucune information concernant leur capacité à solubiliser le Zn. Cette recherche a cependant démontré pour la première fois que des souches des genres *Mucor* et *Fusarium* peuvent solubiliser le Zn.

Cette étude a révélé que les champignons présentaient une plus grande efficacité potentielle en tant que PSM et ZnSM que les bactéries présentes dans les sols agricoles dans le cadre de systèmes de rotation des cultures et d'amendements du sol. *Fusarium circinatum* et *Fusarium longifundum* ont été isolés de sols cultivés dans le cadre de systèmes de rotation des cultures. *Mucor circinelloides* a également été identifié à la fois dans les sols cultivés et dans les amendements du sol, tandis qu'*Aspergillus awamori* a été trouvé dans les amendements du sol. Cependant, les diverses conditions du sol dans les sols non cultivés et les amendements du sol ont posé des défis pour déterminer comment ces conditions affectent la présence et l'efficacité de diverses espèces microbiennes. Des résultats similaires ont été démontrés dans des études montrant que les PSM et les ZnSM efficaces sont plus abondants dans les systèmes de rotation des cultures que dans les environnements non cultivés.

aux racines des plantes cultivées, fournissant des nutriments spécifiques qui favorisent une croissance microbienne différentielle, ce qui à son tour a un impact sur la composition et la densité de la communauté microbienne du sol [35]. Une autre étude a comparé la densité de population et la répartition biogéographique des PSM de 40 sites différents à travers la Chine et a rapporté que les PSM sont plus abondants dans les sols agricoles que dans les déserts, les forêts, les prairies et les sols miniers [34]. De même, une étude antérieure a également démontré que l'utilisation des terres (par exemple, sols non cultivés et sols cultivés) peut avoir un effet prononcé sur la capacité de solubilisation entre les souches, même celles du même genre [20,61,62]. Dans cette étude, les auteurs ont rapporté que les sols non cultivés présentaient des PSM plus efficaces que les sols cultivés en raison de la faible capacité des PSM dans les sols cultivés résultant de pratiques agricoles intensives. Pour promouvoir des PSM efficaces, l'étude a recommandé l'adoption de pratiques agricoles durables et d'engrais organiques. Ainsi, cette étude démontre que les amendements organiques du sol et les bonnes pratiques agricoles, telles que la rotation des cultures, peuvent promouvoir des PSM et des ZnSM efficaces. Néanmoins, évaluer la relation entre leur prévalence et des paramètres tels que les niveaux disponibles de P et de Zn, ainsi que le pourcentage de matière organique, s'est avéré difficile en raison des variations de ces paramètres, car les amendements du sol présentaient des valeurs plus élevées que les sols cultivés.

La présente étude a également souligné que s'il est important de cribler les PSM et les ZnSM en utilisant différentes sources de P et de Zn insolubles dans les milieux, le criblage qualitatif devrait être complété par un criblage quantitatif dans des bouillons pour identifier les PSM et les ZnSM efficaces. Cette étude souligne également le potentiel de l'utilisation de consortiums microbiens pour solubiliser/minéraliser diverses sources de sol insolubles, ce qui pourrait améliorer considérablement les rendements et la qualité des cultures. L'inclusion de champignons spécifiques, tels que *Fusarium circinatum* et *Fusarium longifundum*, ainsi que *Mucor circinelloides* et *Aspergillus awamori*, enrichissent ce potentiel. Ces résultats mettent en évidence l'importance de diverses espèces microbiennes dans l'amélioration de la biofortification des sols et, par conséquent, de la productivité agricole.

5. Conclusions

En conclusion, adopter une approche plus efficace pour l'identification de PSM et de ZnSM efficaces implique d'isoler des souches de différents sols ou pratiques de gestion des sols, telles que les systèmes de rotation des cultures ou les amendements du sol. Nos résultats ont révélé que certaines souches fongiques ne produisaient pas de zones de halo sur les plaques de gélose mais présentaient une solubilisation dans un milieu liquide, tandis que les souches bactériennes produisaient des zones de halo mais présentaient une solubilisation plus faible dans un milieu liquide par rapport aux souches fongiques. Ceci met en évidence que la solubilisation du P et du Zn varie en fonction des sources insolubles et des souches inoculées. Ainsi, alors que les tests dans des milieux avec diverses sources insolubles de P et de Zn en tandem constituent une méthode de présélection précieuse pour affiner les souches, des tests supplémentaires dans des bouillons sont conseillés pour fournir une indication acceptable de la capacité de solubilisation du P et du Zn, ainsi que pour identifier des solutions efficaces. PSM et ZnSM. Parmi les 25 isolats, *Aspergillus awamori*, *Fusarium circinatum*, *Fusarium longifundum* et *Mucor circinelloides* ont été sélectionnés comme souches les plus efficaces pour solubiliser le P et le Zn. Cette étude a également montré que les souches des genres *Mucor* et *Fusarium* peuvent solubiliser le Zn. Malgré leur capacité à libérer du P provenant de sources organiques et inorganiques, ainsi que du Zn provenant de différentes sources, étant donné la complexité des conditions du sol par rapport aux contextes *in vitro*, des études plus approfondies sur leurs interactions devraient être menées avant d'envisager des applications. D'autres études devraient également explorer les effets combinés de ces PSM et ZnSM provenant de différents environnements, dans le but de développer un biofertilisant composite doté de propriétés multifonctionnelles de meilleure qualité. Cela pourrait améliorer la biodisponibilité du P et du Zn et améliorer leur efficacité sur le terrain, malgré des facteurs difficiles tels que les propriétés du sol, les conditions environnementales et la compétition avec les micro-organismes indigènes du sol.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, SI-V., AA et JMV ; méthodologie, SI-V. et AA ; analyse formelle, SI-V. ; rédaction – préparation du projet original, SI-V. ; rédaction – révision et édition, SI-V., AA, BR et JMV ; visualisation, SI-V. ; supervision, JMV ; acquisition de financement, JMV Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par la subvention USDA-ARS-Pulse Crop Health Initiative numéro 58-30602032.

Déclaration de disponibilité des données : Les données qui étayaient les conclusions de cette étude sont disponibles auprès de l'auteur correspondant sur demande raisonnable.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Hawkesford, M. ; Horst, W. ; Kichey, T. ; Lambers, H. ; Schjöring, J. ; Møller, IS ; White, P. Chapitre 6 — Fonctions des macronutriments. Dans Nutrition minérale des plantes supérieures de Marschner, 3e éd.; Marschner, P., éd.; Academic Press : San Diego, Californie, États-Unis, 2012 ; pp. 135-189, ISBN 978-0-12-384905-2.
2. Cakmak, I. ; Kutman, UB Biofortification agronomique des céréales avec du zinc : une revue. EUR. J. Sol Sci. 2018, 69, 172-180. [\[Référence croisée\]](#)
3. Haroon, M. ; Khan, S. ; Malik, A. Bactéries solubilisant le zinc : une option pour augmenter l'absorption du zinc par les plantes. Dans les biofertilisants microbiens et disponibilité des micronutriments ; Springer : Cham, Suisse, 2022 ; pp. 207-238, ISBN 978-3-030-76608-5.
4. Prasad, R. ; Shivay, Y. ; Kumar, D. Chapitre deux. Biofortification agronomique des grains de céréales en fer et zinc. Dans Avancées en agronomie ; Elsevier : Amsterdam, Pays-Bas, 2014 ; Volume 125, pp. 55-91, ISBN 978-0-12-800137-0.
5. Zhu, J. ; Li, M. ; Whelan, M. Les activateurs de phosphore contribuent à la disponibilité du phosphore dans les sols agricoles : une revue. Sci. Environ. Total. 2018, 612, 522-537. [\[Référence croisée\]](#)
6. Dinesh, R. ; Srinivasan, V. ; Hamza, S. ; Sarathambal, C. ; Anke Gowda, SJ ; Ganeshamurthy, AN ; Gupta, SB ; Aparna Nair, V. ; Subila, KP ; Lijina, A. ; et coll. Isolement et caractérisation des bactéries solubilisant le Zn potentielles du sol et leurs effets sur les taux de libération de Zn du sol, le Zn disponible dans le sol et la teneur en Zn des plantes. Géoderme 2018, 321, 173-186. [\[Référence croisée\]](#)
7. Li, H.-P. ; Han, Q.-Q. ; Liu, Q.-M. ; Gan, Y.-N. ; Rensing, C. ; Rivera, WL ; Zhao, Q. ; Zhang, J.-L. Rôles des bactéries solubilisant le phosphate dans la médiation de la disponibilité du phosphore hérité du sol. Microbiol. Rés. 2023, 272, 127375. [\[Réf. croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
8. Gupta, DK ; Chatterjee, S. ; Datta, S. ; Veer, V. ; Walther, C. Rôle des engrais phosphatés dans l'absorption des métaux lourds et la détoxification des métaux toxiques. Chemosphère 2014, 108, 134-144. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
9. Mahanty, T. ; Bhattacharjee, S. ; Goswami, M. ; Bhattacharyya, P. ; Das, B. ; Ghosh, A. ; Tribedi, P. Biofertilisants : une approche potentielle pour le développement d'une agriculture durable. Environ. Sci. Polluer. Rés. 2017, 24, 3315-3335. [\[Référence croisée\]](#)
10. Xu, J. ; Fan, L. ; Xie, Y. ; Wu, G. Stratégie d'équilibre de recyclage pour le contrôle de la pollution par le phosphogypse dans les usines d'engrais phosphatés. J. Nettoy. Prod. 2019, 215, 175-197. [\[Référence croisée\]](#)
11. Indraratne, SP ; Spengler, M. ; Hao, X. Charges de fumier de bétail et effets hérités sur la disponibilité du cuivre et du zinc en culture pluviale et les conditions irriguées. Peut. J. Sol. Sci. 2021, 101, 305-316. [\[Référence croisée\]](#)
12. Aboyeji, C. ; Dunsin, O. ; Aruna Olasekan, A. ; Suleiman, K. ; Chinedum, C. ; Foi, O. ; Joseph, A. ; Ejue, W. ; Adésola, O. ; Olofintoye, J. ; et coll. Effets synergiques et antagonistes des engrais P et Zn appliqués au sol sur les performances, la composition en minéraux et en métaux lourds de l'arachide. Ouvrez Agric. 2020, 5, 1–9. [\[Référence croisée\]](#)
13. Pavinato, PS ; Chérubin, MR ; Soltangheisi, A. ; Rocha, GC ; Chadwick, RD ; Jones, DL Révéler le phosphore hérité du sol pour Promouvoir l'agriculture durable au Brésil. Sci. Représentant 2020, 10, 15615. [\[CrossRef\]](#)
14. Sánchez-Rodríguez, AR ; Rey, MD ; Nechate-Drif, H. ; Castillejo, M.Á. ; Jorriñ-Novó, JV ; Torrent, J. ; del Campillo, MC ; Sacristán, D. Combiner la fertilisation P et Zn pour améliorer le rendement et la qualité des grains de maïs cultivé sur les sols méditerranéens. Sci. Représentant 2021, 11, 7427. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
15. Zou, T. ; Zhang, X. ; Davidson, EA Tendances mondiales de l'utilisation du phosphore sur les terres cultivées et défis en matière de durabilité. Nature 2022, 611, 81-87. [\[Référence croisée\]](#)
16. Afkairin, A. ; Dixon, MM ; Buchanan, C. ; Hippolyte, JA ; Manter, DK ; Davis, JG ; Vivanco, JM Exploiter les bactéries insensibles aux engrais phosphorés (P) pour améliorer la biodisponibilité du P dans la rhizosphère des légumineuses. Microorganismes 2024, 12, 353. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
17. FAO. L'avenir de l'alimentation et de l'agriculture : tendances et défis ; Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture : Rome, Italie, 2017 ; ISBN978-92-5-109551-5.
18. Natasha, N. ; Shahid, M. ; Bibi, moi ; Iqbal, J. ; Khalid, S. ; Murtaza, B. ; Bakhat, HF ; Farooq, ABU ; Amjad, M. ; Hammad, HM ; et coll. Zinc dans le système sol-plante-humain : une analyse des données. Sci. Environ. Total. 2022, 808, 152024. [\[Réf. croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
19. Dixon, MM ; Afkairin, A. ; Davis, JG ; Chitwood-Brown, J. ; Buchanan, CM ; Hippolyte, JA ; Manter, DK ; Vivanco, JM La domestication des tomates plutôt que les événements de sélection ultérieurs réduit les associations microbiennes liées à la récupération du phosphore. Sci. représentant 2024, 14, 9934. [\[Réf. croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
20. Kaur, R. ; Kaur, S. Variation des bactéries solubilisant le phosphate des sols vierges et agricoles du Pendjab. Curr. Microbiol. 2020, 77, 2118-2127. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
21. Lui, Y. ; Pantigoso, HA ; Wu, Z. ; Vivanco, JM Co-inoculation de bacillus sp. et pseudomonas putida, à différents stades de développement, agit comme un biostimulant pour favoriser la croissance, le rendement et l'absorption des nutriments de la tomate. J.Appl. Microbiol. 2019, 127, 196-207. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
22. Tariq, MR ; Shaheen, F. ; Mustafa, S. ; ALI, S. ; Fatima, A. ; Shafiq, M. ; Safdar, W. ; Karité, Minnesota ; Hameed, A. ; Nasir, MA Les micro-organismes solubilisant le phosphate isolés des plantes médicinales améliorent la croissance de la menthe. PeerJ 2022, 10, e13782. [\[Référence croisée\]](#)

23. Wang, C. ; Poële, G. ; Lu, X. ; Qi, W. Microorganismes solubilisant le phosphore : promoteurs potentiels de l'agriculture et de l'environnement ingénierie. *Devant. Bioeng. Biotechnologie.* 2023, 11, 1181078. [\[Réf. croisée\]](#)
24. Armandeh, M. ; Mahmoudi, N. ; Nosratabad, A. Criblage et évaluation des bactéries solubilisant le phosphate isolées des étangs d'aquaculture dans le cadre d'une stratégie étape par étape en tant que biofertilisant potentiel. *J.Appl. Microbiol.* 2022, 133, 15660. [\[Réf. croisée\]](#)
25. Pantigoso, HA; Hé.; Manter, DK ; Fonte, SJ; Vivanco, JM, des bactéries solubilisant le phosphore isolées de la rhizosphère de la pomme de terre sauvage *solanum bulbocastanum* améliorent la croissance des variétés de pommes de terre modernes. *Taureau. Natl. Rés. Cent.* 2022, 46, 224. [\[Réf. croisée\]](#)
26. Tallapragada, P. Solubilisation de différents phosphates inorganiques par *Aspergillus niger* et *penicillium oxalicum*. *Av. Biorecherche* 2015, 6, 113-119.
27. Iqbal, U. ; Jamil, N. ; Ali, moi ; Hasnain, S. Effet des isolats bactériens solubilisant le phosphate de zinc sur la croissance de *vigna radiata*. *Anne. Microbiol.* 2010, 60, 243-248. [\[Référence croisée\]](#)
28. Zaheer, A. ; Malik, A. ; Sher, A. ; Mansoor Qaisrani, M. ; Mehmood, A. ; Ullah Khan, S. ; Achraf, M. ; Mirza, Z. ; Karim, S. ; Rasoul, M. **Isolement, caractérisation et effet de souches bactériennes solubilisant le phosphate-zinc sur la croissance du pois chiche (*Cicer arietinum* L.).** *Saoudien J. Biol. Sci.* 2019, 26, 1061-1067. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
29. Cheikh, S. ; Saraf, M. Optimisation des conditions de croissance pour les bactéries et champignons associés à la croissance des plantes solubilisant le zinc. *J.Adv. Rés. Biotechnologie.* 2017, 2, 1–9. [\[Référence croisée\]](#)
30. Eshaghi, E. ; Nosrati, R. ; Owlia, P. ; Malboobi, MA; Ghaseminejad, P. ; Ganjali, MR Caractéristiques de solubilisation du zinc des bactéries efficaces du sol productrices de sidérophores. *L'Iran. J. Microbiol.* 2019, 11, 419-430. [\[Référence croisée\]](#)
31. Ahmad, moi ; Ahmad, M. ; Hussein, A. ; Jamil, M. Utilisation intégrée de la souche IA6 de *Bacillus subtilis* solubilisant le phosphate et de *Bacillus* sp. souche IA16 : Une approche prometteuse pour améliorer la croissance du coton. *Folia Microbiol.* 2021, 66, 115-125. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
32. Bolo, P. ; Mucheru-Muna, MW ; Mwirichia, RK; Kinyua, M. ; Ayaga, G. ; Kihara, J. Influence de l'application de fumier de ferme sur l'abondance potentielle d'espèces microbiennes solubilisant le zinc dans un ferralsol de l'ouest du Kenya. *Agriculture* 2023, 13, 2217. [\[CrossRef\]](#)
33. Bolo, P. ; Kihara, J. ; Mucheru-Muna, M. ; Njeru, EM; Kinyua, M. ; Sommer, R. L'application de résidus, d'engrais inorganiques et de chaux affectent les micro-organismes solubilisant le phosphore et la biomasse microbienne sous différents systèmes de travail du sol et de culture dans un ferralsol. *Geoderma* 2021, 390, 114962. [\[CrossRef\]](#)
34. Li, J. ; Lu, J. ; Wang, H. ; Croc, Z. ; Wang, X. ; Feng, S. ; Wang, Z. ; Yuan, T. ; Zhang, S. ; Ou, S. ; et coll. Une synthèse complète dévoile les mystères des microbes solubilisant le phosphate. *Biol. Le révérend Camb. Philos. Soc.* 2021, 96, 2771-2793. [\[Référence croisée\]](#)
35. Fernández, LA; Agaras, B. ; Mur, LG ; Valverde, C. Abondance et ribotypes de bactéries solubilisant le phosphate en Argentine sols agricoles sous gestion sans labour. *Anne. Microbiol.* 2015, 65, 1667-1678. [\[Référence croisée\]](#)
36. Jayakumar, P. ; Gurusamy, R. ; Sakthivel, N. Microbiome du sol rhizosphérique et du lombricompost et leurs applications dans la fertilité des sols, la gestion des ravageurs et des agents pathogènes pour une agriculture durable. Dans *Gestion de la fertilité des sols pour le développement durable* ; Springer : Singapour, 2019 ; pp. 189-210, ISBN 9789811359033.
37. Matteoli, FP; Passarelli-Araujo, H. ; Reis, RJA; da Rocha, LO; de Souza, EM; Aravind, L. ; Olivares, Floride ; Venancio, TM Séquençage du génome et évaluation des propriétés favorisant la croissance végétale d'une souche de *serratia marcescens* isolée du lombricompost. *Génome BMC.* 2018, 19, 750. [\[Réf. croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
38. Hamida, B. ; Harini, G. ; Rupela, OP ; Wani, SP ; Reddy, G. Promotion de la croissance du maïs par des bactéries solubilisant les phosphates isolé des composts et de la macrofaune. *Microbiol. Rés.* 2008, 163, 234-242. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
39. Kamwal, A. *Pseudomonas* spp., une bactérie de lombricompost zolubilisant le zinc avec une activité favorisant la croissance des plantes, modère le zinc biofortification de la tomate. *Int. J.Veg. Sci.* 2021, 27, 398-412. [\[Référence croisée\]](#)
40. Rodriguez, JB ; Soi, JR ; Soltanpour, PN Conditions optimales pour l'analyse du phosphore par la méthode acide ascorbique-bleu de molybdène. *Science du sol. Soc. Suis. J.* 1994, 58, 866-870. [\[Référence croisée\]](#)
41. Nautiyal, CS Un milieu de croissance microbiologique efficace pour le dépistage des micro-organismes solubilisant le phosphate. *FEMS Microbiol. Lett.* 1999, 170, 265-270. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
42. Li, KS; Zeghbroeck, JV ; Liu, Q. ; Zhang, S. Isoler et caractériser les bactéries solubilisant le phosphore des rhizosphères de plantes indigènes cultivées dans des sols calcaires. *Devant. Environ. Sci.* 2021, 9, 802563. [\[CrossRef\]](#)
43. Nguyen, C. ; Yan, W. ; Le Tacon, F. ; Lapeyrie, F. Variabilité génétique de l'activité de solubilisation du phosphate par les mycéliums monocyotes et dicaryotes du champignon ectomycorhizien *laccaria bicolor* (maire) pd orton. *Sol végétal* 1992, 143, 193-199. [\[Référence croisée\]](#)
44. Mittal, V. ; Singh, O. ; Nayyar, H. ; Kaur, J. ; Tewari, R. Effet stimulant des souches fongiques solubilisant le phosphate (*aspergillus awamori* et *aenicillium citrinum*) sur le rendement du pois chiche (*cicer arietinum* l. cv. gpf2). *Biol du sol. Biochimie.* 2008, 40, 718-727. [\[Référence croisée\]](#)
45. Afkairin, A. ; Hippolyte, JA; Stromberger, M. ; Davis, JG Solubilisation des sources de phosphore organique par les cyanobactéries et un consortium bactérien commercialement disponible. *Appl. Ecol du sol.* 2021, 162, 103900. [\[Réf. croisée\]](#)
46. Yu, G. ; Smith, DK ; Zhu, H. ; Guan, Y. ; Lam, TT-Y. Ggtree : un package r pour la visualisation et l'annotation des arbres phylogénétiques avec leurs covariables et autres données associées. *Méthodes Ecol. Évol.* 2017, 8, 28-36. [\[Référence croisée\]](#)
47. Brajnikova, YV ; Shaposhnikov, AI; Sazanova, AL; Belimov, AA; Moukacheva, TD ; Ignatova, LV Mobilisation du phosphate par les champignons cultivables et leur capacité à augmenter la disponibilité du P dans le sol et à favoriser la croissance de l'orge. *Curr. Microbiol.* 2022, 79, 240. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
48. Kkan, A. ; Jilani, G. ; Akhtar, M. ; Naqvi, SMS ; Rachid, M. ; Khan, A. ; Akhtar, M. ; Muhammad, S. ; Naqvi, S. ; Rachid, M. **Bactéries solubilisant le phosphore : occurrence, mécanismes et leur rôle dans la production végétale.** *J. Agric. Biol. Sci.* 2009, 1, 48-58.

49. Sharma, SB ; Sayyed, RZ ; Trivedi, MH; Gobi, TA Microbes solubilisant le phosphate : approche durable pour la gestion carence en phosphore dans les sols agricoles. SpringerPlus 2013, 2, 587. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
50. Hassan, M. ; Awad, M. Caractérisation moléculaire des champignons solubilisant le phosphate *Aspergillus niger* et sa corrélation avec agriculture durable. J. Environ. Biol. 2020, 41, 592-599. [\[Référence croisée\]](#)
51. Yadav, LS ; Kushwaha, V. ; Jain, A. Isolement et criblage des champignons solubilisant le phosphate du sol de la rhizosphère du gombo et leur effet sur la croissance de la plante du gombo (*Abelmoschous esculentus* L.). Trop. Plante Rés. 2020, 7, 277-284. [\[Référence croisée\]](#)
52. Tian, J. ; Ge, F. ; Zhang, D. ; Deng, S. ; Liu, X. Rôles des micro-organismes solubilisant le phosphate, depuis la gestion de la carence en phosphore du sol jusqu'à la médiation du cycle p biogéochimique. Biologie 2021, 10, 158. [\[CrossRef\]](#)
53. Alori, ET; Glick, BR; Babalola, OO Solubilisation microbienne du phosphore et son potentiel d'utilisation dans l'agriculture durable. Devant. Microbiol. 2017, 8, 971. [\[Réf. croisée\]](#)
54. Rawat, P. ; Das, S. ; Shankhdhar, D. ; Shankhdhar, S. Microorganismes solubilisant les phosphates : mécanisme et leur rôle dans solubilisation et absorption du phosphate. J. Sol Sci. Plante Nutr. 2020, 21, 49-68. [\[Référence croisée\]](#)
55. Selvi, K. ; JJA, P. ; Velu, V. ; K, S. Analyse de l'efficacité des micro-organismes solubilisant le phosphate par des techniques de culture d'enrichissement. Biochimie. Mol. Biol. J. 2017, 3, 1–7. [\[Référence croisée\]](#)
56. Turan, M. ; Ataoğlu, N. ; Sahin, F. Évaluation de la capacité des bactéries et champignons solubilisant le phosphate sur différentes formes de phosphore en culture liquide. J. Soutenir. Agricole. 2006, 28, 99-108. [\[Référence croisée\]](#)
57. Suleman, D. ; Sani, A. ; Suaib, S. ; Ambardini, S. ; Yanti, Caroline du Nord ; Boer, D. ; Yusuf, DN ; Faad, H. Isolement et identification de bio-inoculants potentiels basés sur des moisissures solubilisant le phosphate provenant de différentes rhizosphères végétales. KnE Life Sci. 2022, 7, 99-109. [\[Référence croisée\]](#)
58. Xiao, C.-Q. ; Chi, R.-A. ; Huang, X.-H. ; Zhang, W.-X. ; Qiu, G.-Z. ; Wang, D.-Z. Optimisation de la solubilisation du phosphate naturel par Champignons solubilisant le phosphate isolés des mines de phosphate. Écol. Ing. 2008, 2, 187-193. [\[Référence croisée\]](#)
59. Zhang, X. ; Rajendran, A. ; Grimm, S. ; Soleil, X. ; Lin, H. ; Son. ; Hu, B. Criblage du phosphore ciblé sur le calcium et le fer champignons solubilisants pour la production agricole. Rhizosphère 2023, 26, 100689. [\[CrossRef\]](#)
60. Weyers, E. ; Strawn, DG ; Pic, D. ; Moore, AD ; Boulanger, LL; Cade-Menun, B. Spéciation du phosphore dans les sols calcaires suite amendements annuels du fumier laitier. Science du sol. Soc. Suis. J. 2016, 80, 1531-1542. [\[Référence croisée\]](#)
61. Afkairin, A. ; Stromberger, M. ; Storteboom, H. ; Wickham, A. ; Sterle, DG ; Davis, JG Réponses de la communauté microbienne du sol à cyanobactéries versus engrais organiques traditionnels. Agriculture 2023, 13, 1902. [\[CrossRef\]](#)
62. Dixon, M. ; Simonne, E. ; Obreza, T. ; Liu, G. Réponse des cultures à une faible biodisponibilité du phosphore, en mettant l'accent sur la tomate. Agronomie 2020, 10, 617. [\[Réf. croisée\]](#)

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.