

Biofertilisants

Ces dernières années, l'utilisation d'additifs organiques, de métabolites naturels actifs ou de micro-organismes utiles fait l'objet de discussions en tant que stratégie écologique pour une production végétale plus durable. On observe dans le monde entier un intérêt croissant pour les inoculants microbiens et l'utilisation ciblée de leurs interactions avec les plantes.

Les micro-organismes utiles peuvent en effet favoriser la croissance des végétaux en augmentant leur tolérance aux conditions défavorables du sol et de l'environnement ou en améliorant leur capacité de stockage de nutriments. Toutefois, le développement d'inoculants microbiens spécifiques, appelés biofertilisants, dotés d'effets bénéfiques s'avère très difficile. L'un des défis en particulier est l'adéquation entre applications agricoles et diverses conditions environnementales.

Certains biofertilisants commercialisés actuellement sont de mauvaise qualité ou leur application est compliquée. Autant d'inconvénients qui entraînent une perte de confiance des agriculteurs et des agricultrices. Néanmoins, l'amélioration de la qualité des formulations microbiennes et les progrès réalisés dans la compréhension des mécanismes biologiques ont contribué à accroître progressivement la rentabilité des applications au champ. Cette fiche résume les dernières avancées de la recherche en la matière.



Le rôle des micro-organismes du sol en agriculture

La révolution verte du XX^e siècle a permis une forte hausse de la production alimentaire mondiale. Celle-ci a été principalement marquée par deux évolutions: l'utilisation de produits chimiques (par exemple pesticides, engrais chimiques) et l'amélioration des cultures à l'aide de la sélection ciblée et de la modification génétique. Cependant, les résultats obtenus avec les produits phytosanitaires chimiques sont associés à des coûts environnementaux élevés. Depuis plusieurs années, les appels se font de plus

en plus pressants en faveur de la diminution de l'utilisation de produits chimiques dans l'agriculture et du développement de systèmes agro-alimentaires plus durables, tant du point de vue environnemental que de la santé humaine. L'utilisation d'intrants microbiens et la promotion des communautés microbiennes en tant que méthode naturelle à faible impact environnemental constituent une approche prometteuse pour atteindre ces objectifs¹.

¹ ohioline.osu.edu/factsheet/SAG-16

Les micro-organismes du sol sont les organismes les plus nombreux sur Terre: il y a plus de microbes dans une cuillère à café de sol que d'habitants dans le monde. Selon le type d'écosystème, le sol peut renfermer jusqu'à 500 g de bactéries, 500 g d'actinomycètes et 1,5 kg de champignons par mètre carré jusqu'à une profondeur de 15 cm. Certains d'entre eux sont essentiels à la décomposition des matières organiques et au recyclage des nutriments, tandis que d'autres interagissent avec les racines des plantes et leur apportent des nutriments importants^[2]. Ce potentiel a été reconnu, débouchant sur leur exploitation à des fins commerciales. L'agriculture intensive réduit la densité et l'activité microbologique du sol. L'utilisation de substances contenant

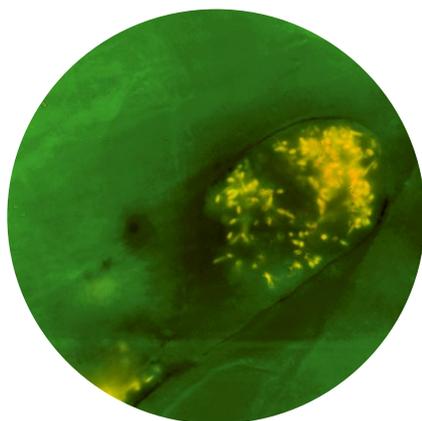
des micro-organismes peut potentiellement contribuer à restaurer les populations microbiennes^[3]. Le recours à des micro-organismes vivants ne date pas d'hier, puisqu'il a été pratiqué dès le début de XX^e siècle avec l'inoculation à grande échelle de rhizobia de légumineuses qui sont des fixateurs d'azote. Récemment, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Glomus*, *Azotobacter*, *Trichoderma* et d'autres souches ont été commercialisées et largement étudiées et décrites en raison de leur capacité à accroître la production végétale^[1,4]. Au cours de la dernière décennie, le marché mondial des biofertilisants a connu une croissance constante. En 2019, il était estimé à 1 milliard de dollars et devrait atteindre un taux de croissance annuel moyen de 12,8 % entre 2020 et 2027².

Qu'est-ce que les biofertilisants ?

Les inoculants microbiens, également appelés «inoculants du sol» ou «inoculants biologiques», sont des intrants agricoles contenant des micro-organismes rhizosphériques ou endophytes utiles qui favorisent la croissance des plantes. Il existe différentes espèces d'inoculants microbiens selon leur fonction. Seuls les biofertilisants sont présentés dans cette fiche.

En bref

Les biofertilisants sont des produits qui contiennent des cellules vivantes ou inactives de bactéries, de champignons ou d'algues efficaces, seuls ou en association. Les micro-organismes qu'ils contiennent sont en mesure de coloniser la rhizosphère ou l'intérieur de la plante. Ils favorisent la croissance des végétaux en améliorant l'absorption des principaux nutriments. Les biofertilisants peuvent être appliqués sur le sol, la semence ou la surface des végétaux.



Kosakonia pseudosacchari, un fixateur d'azote associatif, colonise les racines du tabac, sans entrer en symbiose.

Espèces de biofertilisants et modes d'action

Fixateurs d'azote

Certaines souches bactériennes et algues sont capables de fixer l'azote atmosphérique (N) et de le restituer sous des formes assimilables par les plantes, telles que l'ammoniac et le nitrate. Ce processus est appelé fixation biologique de l'azote (FBA)^[5].

Ce mécanisme permet l'utilisation de certains micro-organismes comme biofertilisants pour remplacer les engrais azotés minéraux. Cela pourrait aider à préserver les réserves d'azote dans le sol de manière naturelle^[6]. Les fixateurs d'azote peuvent être divisés en trois groupes: bactéries libres et associatives telles qu'*Azobacter* et *Azospirillum* et les bactéries symbiotiques telles que *Rhizobium*, *Frankia* et *Azolla*. Dans les zones (sub-)tropicales, les fixateurs d'azote non symbiotiques contribuent à l'absorption de l'azote par les plantes. Le phénomène existe aussi, mais dans une moindre mesure, sous les climats tempérés.

Azotobacter: ce sont des bactéries fixatrices d'azote libres et associatives. Outre la FBA, les souches d'*Azotobacter* offrent de nombreux autres effets bénéfiques qui stimulent la croissance et améliorent l'absorption des nutriments par les plantes. Résultat: une croissance accrue, un rendement supérieur et une meilleure qualité de la récolte^[7,8].

2 www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biofertilizers-industry

Azospirillum: parmi les bactéries fixatrices d'azote associatives, *Azospirillum* a été l'une des premières à être découvertes et est aujourd'hui l'une des mieux caractérisées. La capacité d'*Azospirillum* à favoriser la croissance végétale est imputée à divers mécanismes, dont la résistance aux maladies et la tolérance à la sécheresse, mais plus spécifiquement à la FBA^[9].

Rhizobia: ce sont des bactéries fixatrices d'azote symbiotiques, qui sont responsables de la formation de nodules sur les légumineuses avec lesquelles elles entrent en symbiose (image ci-contre). Ce type de symbiose contribue pour une part importante à la teneur en azote de la biosphère^[10]. Cette interaction est particulièrement intéressante, sachant que les légumineuses constituent l'une des cultures et des plantes fourragères les plus importantes au monde.

Autres fixateurs d'azote: *Frankia* est bien connue pour son aptitude à former une symbiose avec certaines plantes hôtes en fixant l'azote au niveau de leurs racines^[11]. *Azolla*, communément appelée fougère moustique, fausse fougère, mousse des fées ou fougère aquatique, est une petite fougère aquatique flottante^[12]. Les biofertilisants contenant *Azolla* entraînent une hausse considérable de la teneur en azote des sols de rizière notamment. Les cyanobactéries peuvent vivre sous une forme libre ou en symbiose avec les lichens, les fougères et les cycadées. Leur part dans la FBA totale est élevée, mais elles ne peuvent fixer l'azote atmosphérique que dans des conditions de faible teneur en azote^[13].



Nodules sur des racines de soja



Trichoderma asperelum sur une plaque de gélose

Solubilisateurs de phosphore

Le phosphore (P) est un macronutriment majeur du sol qui est nécessaire à la croissance et au développement des végétaux. Il est impliqué dans diverses fonctions biologiques fondamentales, mais sa disponibilité est limitée. Par conséquent, les engrais phosphatés sont les produits agrochimiques les plus utilisés après les engrais azotés [14].

Dans le sol, la solubilisation du phosphore est principalement assurée par les bactéries solubilisatrices de phosphore (BSP) et, dans une moindre mesure, par des champignons solubilisateurs de phosphore (CSP)^[15]. On estime que 20 à 25 % des besoins en phosphore des plantes sont satisfaits par des bactéries et des champignons. Les bactéries du sol *Pseudomonas putida* et *Bacillus megaterium* ont été particulièrement bien étudiées. Les types de champignons les plus connus sont *Aspergillus*, *Penicillium* et *Trichoderma*. Certains actinomycètes sont également connus pour leur activité de solubilisation du phosphore et sont de plus en plus prisés du fait de leur capacité à survivre dans des environnements extrêmes^[16].

Solubilisateurs de potassium et de zinc

Le potassium (K) est également un macronutriment important pour le développement des plantes. Le potassium est naturellement présent en grande quantité dans le sol, dont seuls 1 à 2 % sont sous une forme assimilable par les végétaux^[17]. Les bactéries, les champignons et les actinomycètes peuvent dissoudre le potassium dans le sol par le biais de diverses réactions chimiques^[16,18]. *Bacillus licheniformis*, *Pseudomonas azotoformans* et *Enterobacter hormoechei* figurent parmi les solubilisateurs de potassium les plus efficaces, comme le montrent les expérimentations menées sur le riz et le concombre^[19,20,21].

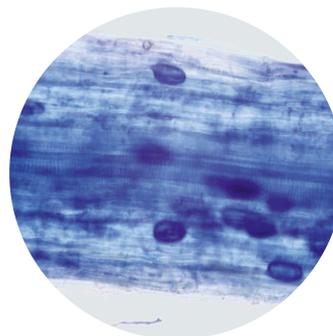
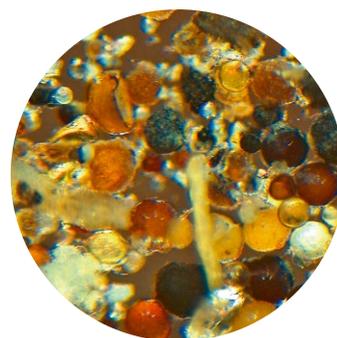
Le zinc (Zn) peut être dissous par diverses espèces microbiennes telles que *Bacillus subtilis*, *Thiobacillus thiooxidans* et *Saccharomyces sp.*^[22]. Ces micro-organismes peuvent être utilisés comme biofertilisants afin d'augmenter la disponibilité du zinc sous une forme assimilable par les plantes.

Champignons mycorhiziens arbusculaires

Ces champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) sont des symbiotes appartenant au groupe des gloméromycètes. Ils forment des associations symbiotiques avec les racines de plus de 80 % de toutes les plantes terrestres, y compris la plupart des cultures agricoles^[23].

Les champignons jouent un rôle fondamental dans l'accès des végétaux aux nutriments miné-

Spores de différents types de CMA extraits d'un sol cultivé.



CMA colonisant des racines de sorgho.

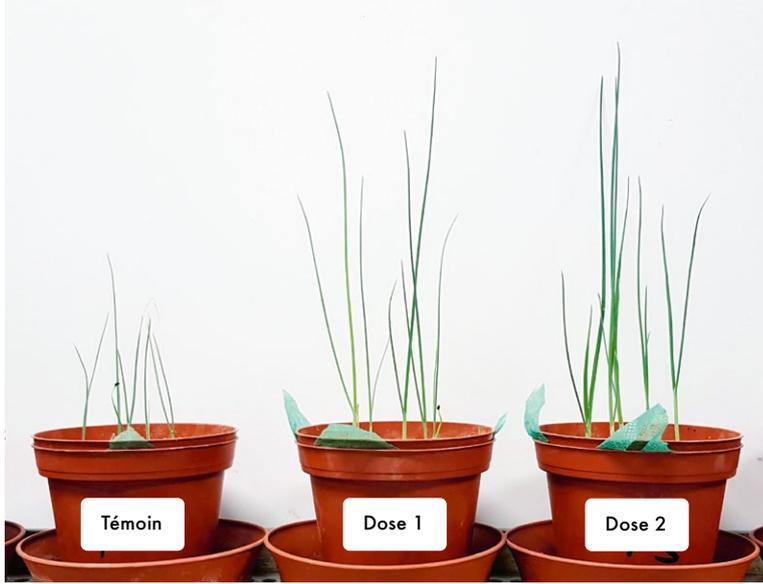
CMA colonisant des racines de maïs avec des hyphes, des arbuscules et des vésicules.



raux du sol. Il a été démontré qu'ils augmentaient l'absorption par la plante du phosphore et du zinc en particulier, mais également de l'azote, du potassium, du magnésium, du calcium et du soufre^[24,25]. En outre, les CMA apportent d'autres bénéfices aux plantes: ils améliorent par exemple la tolérance à la sécheresse et au sel, ainsi que la résistance aux maladies^[24]. Rien d'étonnant donc à l'intérêt croissant que suscite leur utilisation comme biofertilisants dans l'agriculture, l'horticulture, la reforestation et la restauration des terres désertiques ces dernières années^[25].

Autres mycorhizes

On entend généralement par mycorhize l'association symbiotique entre un champignon et les racines d'une plante. De nombreuses espèces d'arbres dans les forêts du monde dépendent des *ectomycorhizes* (ECM). Au plan taxonomique, les champignons qui forment des ECM appartiennent au groupe des *basidiomycètes* et, dans une moindre mesure, au groupe



Poireaux croissant en l'absence (témoin) et en présence d'une faible dose (dose 1) et d'une forte dose (dose 2) d'un consortium microbien dans un sol pauvre en phosphore.

des *ascomycètes*^[26]. Ces champignons mobilisent les nutriments issus de composés organiques, améliorant ainsi leur absorption par les arbres. Parallèlement, ils contribuent aussi à l'apport de carbone aux sols et interviennent donc dans le cycle du carbone dans les écosystèmes forestiers^[26]. La mycorhize éricoïde est une symbiose entre des plantes de l'ordre des *Ericales* et des champignons du sol^[27], tandis que la mycorhize orchidoïde se forme entre des plantes de la famille des *Orchidaceae* et des champignons telluriques^[28]. Cette dernière est décisive pour l'apport de carbone à la plantule pendant la germination^[29].

Consortia microbiens

Les associations de souches microbiennes telles que les rhizobactéries avec des champignons, appelées consortia microbiens, représentent une approche très prometteuse dans le cadre du développement de biofertilisants pour une agriculture durable^[30]. En raison de leurs propriétés complémentaires, les consortia microbiens sont potentiellement multifonctionnels. On estime également que les produits contenant des consortia microbiens pourraient mieux survivre dans des environnements différents que les produits contenant une seule souche. Cet effet est dû au fait que les micro-organismes se stimulent mutuellement par la communication et la différenciation^[31]. Des études ont montré qu'ils améliorent efficacement la croissance et la performance des plantes soumises aux stress abiotiques (température extrême, pH, salinité, sécheresse, métaux lourds et pollution par des pesticides)^[30,32]. Les produits connus dans cette catégorie sont les micro-organismes efficaces (ME) qui jouissent d'une large part de marché. Cependant, plusieurs études ont montré que les effets observés des EM ne sont pas dus aux micro-organismes vivants eux-mêmes. Ce sont en réalité les nutriments dans le substrat contenant les micro-organismes qui favorisent la croissance des plantes^[33,34,35].

Domaines d'application

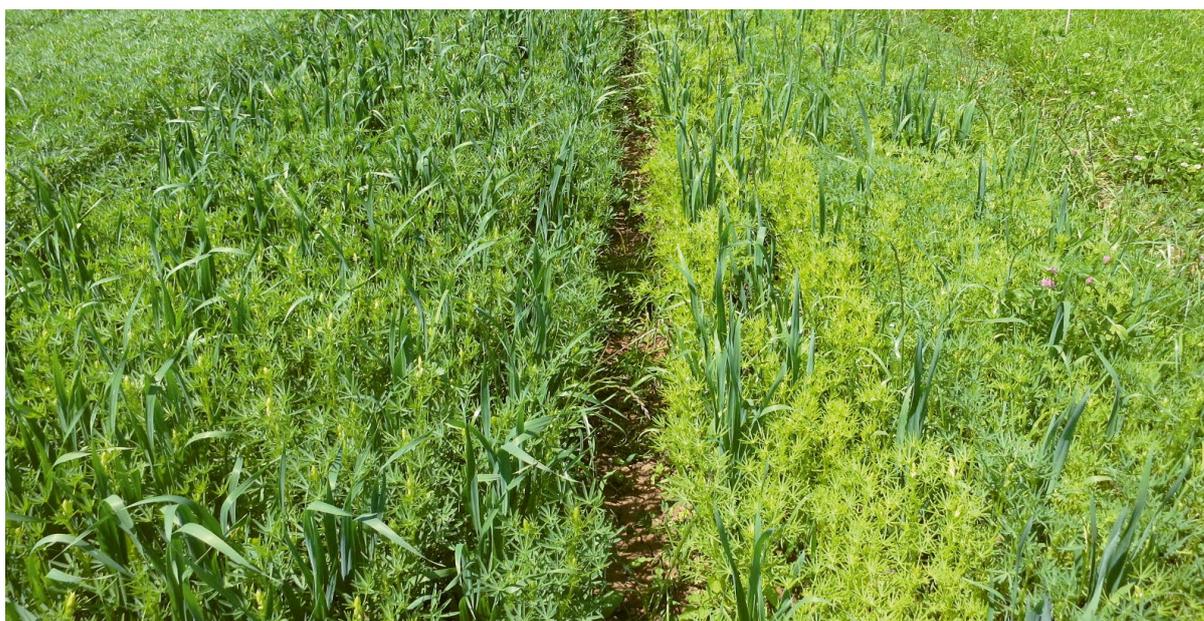
Utilisation en horticulture

Les biofertilisants sont fréquemment utilisés en horticulture pour les raisons suivantes^[36,37,38]:

- production de cultures de qualité supérieure et à haut rendement,
- utilisation de substrats de croissance exempts de micro-organismes appropriés,
- conditions environnementales contrôlables (par opposition à la culture en plein champ),
- possibilité d'application simplifiée grâce à l'irrigation^[36],
- cultures hautement spécialisées et application de méthodes horticoles intensives, qui entraînent une perte de fertilité des sols.

Dans ce contexte, les biofertilisants peuvent contribuer à la croissance des plantes et entraîner une augmentation des communautés microbiennes dans le sol^[36]. Les biofertilisants sont généralement utilisés seuls ou en association avec d'autres engrais dans diverses branches de l'horticulture, notamment la culture maraîchère, la floriculture, l'arboriculture et le jardinage^[37,38].

L'utilisation de biofertilisants contenant des *Azotobacter* seuls ou associés à des souches de *Glomus* dans la culture de pommes et de bananes a amélioré la croissance des plantes et la qualité des fruits^[38,39]. En collaboration avec des partenaires, le FiBL a démontré l'effet bénéfique sur la croissance de CMA indigènes et commerciaux dans la culture de palmiers dattiers et de morelles de Quito lorsqu'ils sont inoculés en serre^[40,41,42]. En floriculture également, l'association de biofertilisants avec des intrants naturels ou chimiques a augmenté la productivité et la qualité des plantes^[43]. L'application combinée d'engrais de ferme et de bactéries solubilisatrices de phosphore a considérablement amélioré le rendement et la teneur en nutriments du souci^[44], tandis que l'inoculation d'*Azotobacter* a augmenté la croissance des tulipes^[45].



Lupins inoculés avec le produit HiStick (à gauche) et non inoculés (à droite).

Utilisation dans les grandes cultures

L'utilisation de biofertilisants ne se limite pas à l'horticulture et gagne également en importance dans les grandes cultures. L'inoculation de rhizobia se pratique depuis longtemps dans la culture des légumineuses. En raison de la spécificité d'hôte des rhizobia, il est très important que les inoculations soient spécifiques des cultures et de l'environnement dans le cas de légumineuses non indigènes telles que le soja ou dans les sols caractérisés par une faible population de rhizobia efficaces^[46]. La photo ci-dessus montre l'utilisation réussie de produits contenant des rhizobia dans un essai en plein champ avec des espèces de lupin, réalisé par le FiBL et des partenaires de recherche. D'autres essais menés par le FiBL ont montré que le choix de produits commerciaux efficaces est une condition préalable à la stabilité des rendements et des teneurs en protéines dans la culture du soja bio^[47]. Les biofertilisants gagnent également en importance dans d'autres grandes cultures. L'utilisation d'*Azospirillum* en association avec d'autres souches microbiennes a donné des résultats favorables dans différentes cultures: *Pseudomonas* a augmenté le rendement du maïs grain et du coton graine^[48], *Azotobacter* le rendement du mil à chandelle, du sorgho et du riz^[49], et *Arthrobacter* associé à une souche bactérienne solubilisatrice de phosphore a augmenté le rendement de l'orge^[50]. Des études menées dans le cadre d'un projet conjoint du FiBL et de partenaires en Suisse et en Inde ont montré que l'inoculation de CMA et de rhizobactéries:

- contribue à réduire de 50 % les besoins en engrais minéraux des pois d'Angole et du mil rouge, tout en produisant le même rendement que la fertilisation par des engrais minéraux uniquement^[51];
- accroît le rendement des cultures, l'apport en minéraux et l'efficacité de l'utilisation du phosphore tout en améliorant la qualité du sol^[52];
- est plus efficace sur les sites où le sol est peu fertile lorsqu'elle est utilisée sous forme de consortia de souches mycorhiziennes et de rhizobactéries.

Utilisation pour la restauration

Un autre domaine qui bénéficie dans une large mesure de l'utilisation des biofertilisants, en particulier des CMA, est la restauration des écosystèmes^[53]. Les activités humaines comme la coupe rase, l'agriculture intensive et l'exploitation minière, mais aussi les facteurs naturels tels que les incendies ou les processus géomorphologiques, affectent la stabilité des écosystèmes naturels. Cela peut conduire à une détérioration de la fertilité du sol et limiter fortement le développement naturel de la végétation. Plusieurs études ont démontré l'utilisation réussie des CMA pour la restauration de la couverture végétale des sols désertifiés dans la région méditerranéenne^[54] et pour la restauration des sols dégradés par l'exploitation minière^[55].

Efficacité des biofertilisants

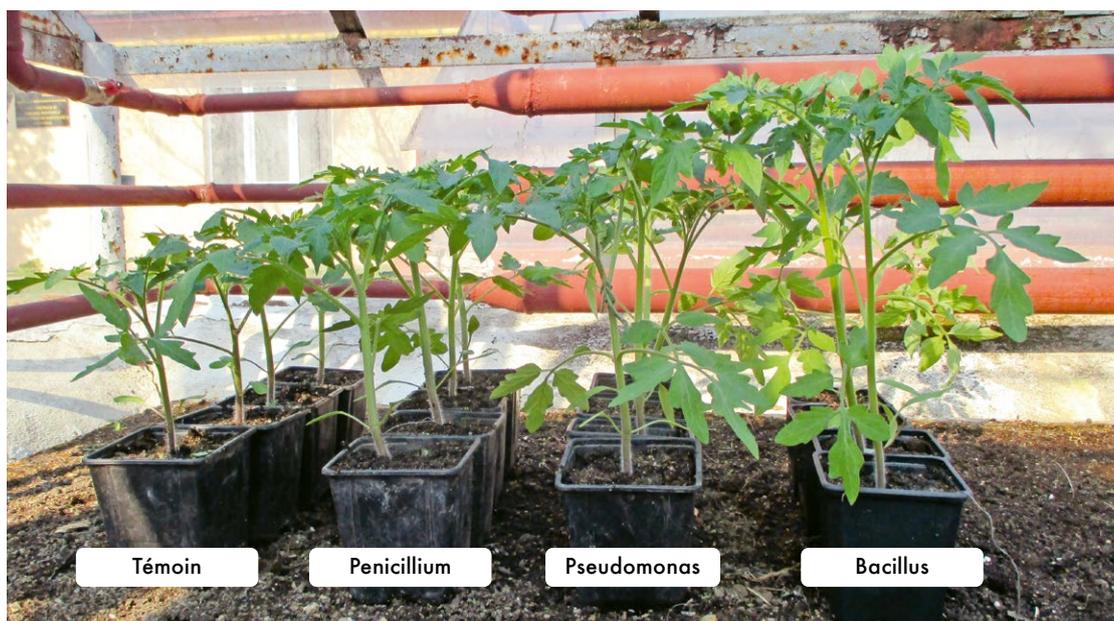
Des chercheurs du monde entier ont mené des études approfondies pour déterminer l'efficacité des biofertilisants sur un large éventail de cultures dans différents écosystèmes. Elles ont donné lieu à un très grand nombre de publications résumant les avantages de divers biofertilisants tels que les CMA, les micro-organismes solubilisateurs de phosphore et les fixateurs d'azote.

Néanmoins, leur application dans la pratique par les agriculteurs et les agricultrices ne produit pas toujours l'effet attendu. Les raisons de cette absence de résultats probants sont diverses et variées. Elles résident principalement dans une combinaison incompatible de facteurs environnementaux, en particulier les conditions du sol, l'espèce de biofertilisant utilisée et la variété cultivée^[56]. Par conséquent, il est impossible à ce jour de formuler des recommandations concrètes en faveur de l'utilisation de certains produits, à quelques exceptions près, à savoir les produits contenant des rhizobia, notamment la souche *Bradyrhizobium*, pour la culture de légumineuses non indigènes.

Cependant, une analyse internationale récente a révélé quelques tendances générales qui permettent de prédire l'efficacité des biofertilisants en fonction des conditions locales du sol, des conditions climatiques, des espèces cultivées et du type de biofertilisant utilisé^[56]. L'étude a montré que l'efficacité dépend fortement des conditions pédologiques, et que les conditions propices à la meilleure performance varient selon le type de biofertilisants utilisés^[56]:

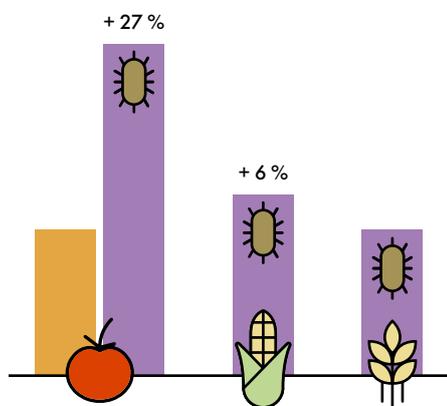
- les CMA ont une efficacité optimale lorsque le sol a une faible teneur en carbone organique et en phosphore assimilable par les plantes (10 à 25 kg de P/ha).
- Les micro-organismes solubilisateurs de phosphore sont particulièrement efficaces en cas de faibles teneurs en carbone organique, mais de teneurs en phosphore assimilable par les plantes légèrement plus élevées dans le sol (25 à 35 kg P/ha).
- Les fixateurs d'azote sont particulièrement efficaces en cas d'augmentation de la teneur du sol en carbone organique et si la teneur du sol en phosphore assimilable par les plantes est supérieure à 45 kg de P/ha.

Outre les conditions pédologiques, le type de culture a également un impact sur l'efficacité des biofertilisants. Les légumineuses, les légumes-feuilles et les légumes-graines réagissent mieux à l'inoculation de biofertilisants que les légumes-racines et les céréales, ce qui pourrait être dû à leurs besoins en nutriments plus élevés.



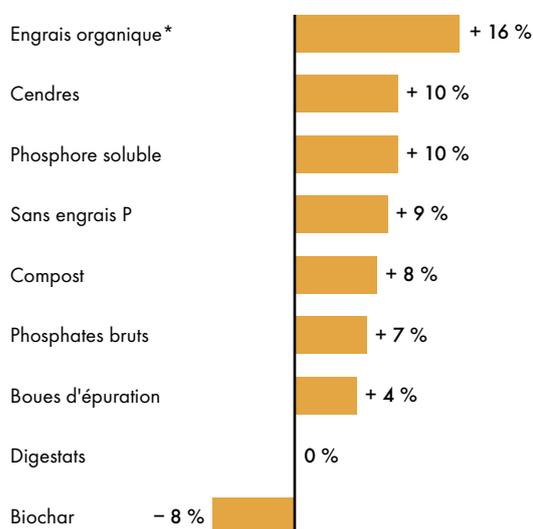
Plants de tomate à croissance variable après application d'un biofertilisant contenant la souche *Penicillium*, *Pseudomonas* ou *Bacillus*, ou sans fertilisant (témoin).

Figure 1: Effet des biofertilisants sur différentes cultures



Les tomates cultivées en serre et/ou en plein champ sont les plantes qui ont le mieux répondu à l'inoculation, avec des hausses de croissance allant jusqu'à 27 %, suivies du maïs avec 6 % et du blé, dont la croissance n'a pas augmenté.

Figure 2: Effet des biofertilisants en fonction des engrais phosphatés associés



L'association de biofertilisants et d'engrais organiques*, tels que le fumier, farines de viande, de plumes ou d'os, a entraîné la plus forte amélioration de la croissance des plantes, suivie de l'association avec la cendre, le phosphore soluble, le compost et le phosphate brut.

Le climat est un autre facteur qui influe sur l'efficacité des biofertilisants. Ces produits se sont avérés efficaces essentiellement dans les régions arides et, dans une moindre mesure, sous les climats tropicaux et continentaux. La principale raison est une fertilité du sol plus faible, à laquelle s'ajoute une teneur réduite en matière organique, azote et phosphore, des caractéristiques typiques des régions arides. Une faible fertilité du sol signifie également une densité et une activité microbiologiques du sol moins élevées, ce qui rend l'application d'inoculants microbiens d'autant plus efficace. Par ailleurs, les plantes cultivées dans les zones arides sont exposées à un plus grand nombre de facteurs de stress, tels que la chaleur, la sécheresse et la salinité. Les micro-organismes peuvent produire une série de molécules (hormones végétales, enzymes et substances végétales secondaires) qui contribuent à réduire le stress subi par les plantes et à stabiliser ainsi leurs rendements.

Effacité dans les régions tempérées

En coopération avec vingt partenaires européens, le FiBL a récemment achevé le projet BIOFECTOR financé par le 7^e programme cadre de l'Union européenne³. Le projet visait à diminuer l'application d'engrais minéraux dans l'agriculture européenne en utilisant des biofertilisants dont certains étaient actuellement commercialisés et d'autres venaient d'être développés. Environ 150 essais ont été menés avec plus de 1100 variantes expérimentales afin d'identifier les biofertilisants les mieux appropriés pour améliorer la culture du maïs, du blé et des tomates et de déterminer les facteurs décisifs pour l'utilisation réussie des produits.

Une étude comparative, menée dans le cadre du projet, a analysé tous les essais en plein champ et en pot. Conclusion: la plante cultivée et le système cultural ainsi que le type d'engrais sont les critères les plus importants pour l'efficacité des biofertilisants. L'étude a montré que les tomates cultivées en serre ou en plein champ (les jeunes plants étant dans ce cas cultivés préalablement en serre) bénéficiaient le plus de l'inoculation de biofertilisants, avec une amélioration de leur croissance pouvant atteindre 27 %, suivies du maïs avec une croissance supérieure de 6 %. En revanche, aucune amélioration de la croissance du blé n'a été observée (Figure 1).

L'étude a également révélé que les biofertilisants amélioraient particulièrement la croissance des plantes dans les sols pauvres en matière organique et en phosphore, confirmant ainsi les résultats rapportés auparavant. L'étude a également montré que le type d'engrais phosphaté influence l'efficacité

3 www.biofactor.info/index.html

des biofertilisants utilisés (Figure 2). L'association de biofertilisants et d'engrais de ferme a montré la meilleure efficacité pour améliorer la croissance des cultures, suivie de l'association avec la cendre, le phosphore soluble, le compost et le phosphate brut.

Au FiBL, cinq essais en pot ont été réalisés avec les sols de deux sites et six essais en plein champ ont été menés sur deux sites en utilisant le maïs comme culture d'essai. Dans les conditions biologiques suisses, aucun des biofertilisants testés n'a amélioré de manière significative la croissance du maïs. En plein champ en particulier, aucun résultat concluant n'a été observé. Tous les essais ont été réalisés sur des sols cultivés selon les méthodes biologiques et présentant une teneur élevée en matière organique, ce qui pourrait être la cause de l'absence de croissance.



Diverses formulations de biofertilisants: liquide, poudre lyophilisée et à base de support.

Formulations pour biofertilisants

Les premières étapes fondamentales pour le développement d'un nouvel inoculant microbien sont l'isolement en laboratoire et la sélection sur la base des caractéristiques favorisant la croissance végétale^[1]. Elles sont suivies d'essais *in vitro*, en serre et/ou en plein champ sur un certain nombre de cultures afin d'évaluer l'efficacité microbienne et la persistance des micro-organismes dans le sol^[57]. Ces étapes sont nécessaires, car même si des résultats intéressants sont obtenus en laboratoire, cela n'implique pas toujours une stimulation de la croissance des plantes en conditions réelles.

Enfin vient l'étape de la multiplication des micro-organismes et de la formulation d'un produit répondant à diverses exigences, notamment une concentration élevée de cellules microbiennes viables et une durée de conservation d'au moins six mois. Pour ce faire, le choix d'une formulation appropriée qui assure la viabilité des micro-organismes, de la production à l'application des inoculants, est extrêmement important^[1].

Formulations solides

Les supports utilisés dans les formulations solides (ou à base de support) peuvent être fabriqués à partir de matériaux organiques, inorganiques ou synthétiques à faible coût et sont faciles à traiter et à stériliser. Ils doivent fournir aux micro-organismes du sol une niche protectrice à court terme, soit en assurant la protection physique, soit en assurant la survie par l'apport de nutriments spécifiques^[58,59].

Tableau 1: Avantages et inconvénients des différentes formulations de biofertilisants

		Avantages	Inconvénients
Biofertilisants solides	Biofertilisants à base de support	<ul style="list-style-type: none"> • Coût réduit • Production facile • Faible investissement 	<ul style="list-style-type: none"> • Courte durée de conservation • Sensibilité thermique • Vulnérabilité à la pollution • Nombre de cellules faible
	Poudres lyophilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de conservation plus longue • Nombre élevé de cellules • Produits stériles 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût très élevé • Investissement élevés par unité de production
Biofertilisants liquides		<ul style="list-style-type: none"> • Durée de conservation plus longue • Tolérance thermique • Nombre élevé de cellules • Haute efficacité • Produits stériles 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé • Investissement élevés par unité de production

Tableau 2: Problèmes liés à la fabrication et à l'utilisation de biofertilisants et solutions possibles

Problème	Solution
Introduction de micro-organismes invasifs ^[64]	Sélection de souches compétitives et adaptées à des régions climatiques, des cultures et des sols spécifiques ^[22]
Produits inefficaces ^[22]	
Produits de basse qualité (absence de cellules viables) ^[64]	Assurance qualité complète et conduite d'études par les fabricants
Mutations des cellules microbiennes pendant la multiplication dans des fermenteurs ^[22]	
Coûts d'investissement élevés ^[65]	Recherche de milieux de croissance alternatifs tels que les sous-produits industriels ^[66]
Compréhension insuffisance du rôle des micro-organismes pour les processus de formation du sol	Sensibilisation des agriculteurs et des agricultrices sur les avantages des biofertilisants grâce à une communication accrue par le biais de revues spécialisées

Il existe deux types de formulations solides: la tourbe et les granulés. La tourbe est un matériau non homogène et complexe qui a une influence variable sur la croissance et la survie des cellules microbiennes pendant la multiplication^[60]. Au cours de la stérilisation de la tourbe, des substances toxiques peuvent être libérées, réduisant la croissance et la survie des micro-organismes, ce qui limite encore davantage l'efficacité microbienne^[58,61].

Les formulations à base de granulés sont composées de tourbe, de calcium, de vermiculite ou de silice. Les granulés sont enrobés ou imprégnés des souches microbiennes souhaitées^[1]. Les procédures d'application des biofertilisants solides sont simples et faciles à contrôler. Les granulés peuvent être placés à proximité des semences pour garantir l'interaction des micro-organismes avec la rhizosphère^[58]. Cependant, leur utilisation présente un certain nombre d'inconvénients. D'une part, la taille volumineuse des biofertilisants solides entraîne des coûts élevés de transport et de stockage. D'autre part, les concentrations de micro-organismes dans les formulations solides diminuent rapidement en raison de l'absence de nutriments ou d'agents pro-

tecteurs des cellules microbiennes. Par conséquent, l'application doit être répétée plus souvent afin d'obtenir les résultats souhaités^[1].

Autre formulation solide, d'un type particulier et plus stable: les **poudres lyophilisées**. Elles sont produites par lyophilisation directe des micro-organismes cibles avec des substances telles que le glucose pur ou la poudre de lait, qui assurent la protection nécessaire des cellules microbiennes contre les dommages causés par le gel^[62].

Formulations liquides

Outre les cellules microbiennes, les formulations liquides peuvent également contenir des nutriments, des protecteurs cellulaires spéciaux ou des substances chimiques qui favorisent la formation de spores ou de kystes. Ces additifs augmentent la durée de conservation des produits et la tolérance au stress des micro-organismes^[63].

Les formulations liquides offrent une solution à de nombreux problèmes associés aux formulations solides. En effet, elles ont une **durée de conservation** plus longue (deux ans contre six mois pour les formulations solides) et tolèrent mieux les températures élevées jusqu'à 55°C (Tableau 1). Par ailleurs, les formulations liquides ont des densités de population supérieures allant jusqu'à 10⁹ unités formant colonie (UFC) par ml⁻¹, contre seulement 10⁸ UFC par g⁻¹ pour les formulations solides. Elles peuvent également être appliquées plus facilement par le biais des systèmes d'irrigation.

Risques et limites des biofertilisants

Nous avons vu dans ce qui précède les limites des biofertilisants, dont l'efficacité est influencée par des facteurs environnementaux et par la concurrence/l'antagonisme avec d'autres micro-organismes du sol. En outre, une manipulation un transport et un stockage inadéquats peuvent entraîner une diminution de la performance après l'utilisation de biofertilisants. D'autres problèmes liés à la production et à l'utilisation de biofertilisants et à leurs solutions possibles sont répertoriés dans le Tableau 2.



Intégration du trèfle dans la rotation des cultures.

Alternative: promotion des micro-organismes indigènes du sol

Une alternative à long terme à l'utilisation de biofertilisants est d'augmenter la population des micro-organismes indigènes du sol pour améliorer les processus de formation du sol et donc favoriser la croissance des plantes et accroître la performance des cultures. Des études menées au FiBL ont montré qu'un éventail de méthodes de culture, telles que celles utilisées en agriculture biologique, promeuvent les micro-organismes naturellement présents dans le sol. Parmi celles-ci figurent la rotation des cultures, le travail réduit du sol, l'incorporation de légumineuses et de couverts végétaux dans la rotation et l'application d'engrais organiques comme le compost. Certaines de ces pratiques peuvent être facilement intégrées

dans les systèmes culturaux existants pour augmenter la taille et l'activité des communautés microbiennes^[66]. Plusieurs études réalisées sur le site du FiBL ont mis en évidence les effets bénéfiques du compost sur la santé et la fertilité des sols, qui sont dus, entre autres, aux micro-organismes présents dans le compost^[67,68]. Il n'existe jusqu'à présent que peu de preuves scientifiques concernant l'efficacité d'autres pratiques empiriques, notamment l'utilisation de thé de compost, sur les plantes et les sols. Une étude menée en Allemagne a montré que le thé de compost augmentait la résistance du maïs à la sécheresse^[69]. Toutefois, d'autres études sont nécessaires pour confirmer l'effet bénéfique.

Applications en agriculture biologique

Les micro-organismes sont traditionnellement utilisés en agriculture biologique, et aucune réserve n'a été émise quant à leur application. Dans la législation européenne relative à l'agriculture biologique, l'utilisation des micro-organismes est régie par l'art. 3, paragr. 4, du règlement (CE) n°889/2008, mais n'est pas explicitement mentionnée à l'annexe I du règlement. À la date de rédaction de cette fiche, un nouveau règlement est en cours d'élaboration, mais les auteurs ne s'attendent à aucune modification concernant l'utilisation des biofertilisants, qui est soumise aux critères suivants:

- Les micro-organismes ne doivent pas être génétiquement modifiés.

- Les produits doivent être conformes aux règles de sécurité biologique (c'est-à-dire que les micro-organismes doivent être appliqués conformément aux recommandations du fabricant) et ils doivent être sans danger pour les humains, l'environnement, les plantes et les animaux.
- Des précautions particulières doivent être prises avec les souches importées. Afin de satisfaire à ces exigences, l'identité (espèce et souche) du ou des micro-organismes contenus dans le produit doit être connue.

Les agriculteurs et agricultrices biologiques doivent vérifier ces critères avant d'utiliser des biofertilisants. En cas de doute, ils doivent contacter leur organisme de certification. Dans les pays possédant une liste nationale d'intrants approuvés, celle-ci indique les biofertilisants qu'il est possible d'utiliser.

Au sein de l'UE, la Politique agricole commune (PAC) promeut l'utilisation des biofertilisants parallèlement aux méthodes de culture biologiques. Elle considère en effet que l'utilisation de biofertilisants est une pratique agricole durable. L'UE mobilise

jusqu'à 30 % de son budget sous la forme de paiements verts versés aux exploitants et exploitantes agricoles qui respectent les exigences environnementales (2022). En raison du cadre réglementaire favorable en Amérique du Nord comme en Europe, le marché des biofertilisants devrait poursuivre son essor au cours des années à venir. Quoi qu'il en soit, l'éventail des produits devra être conforme à la législation européenne et nationale dans le domaine de l'agriculture biologique, ainsi qu'aux règles relatives aux engrais et à la biosécurité.

Quelles perspectives?

Plusieurs études ont démontré avec succès le potentiel des biofertilisants pour augmenter les rendements et la qualité de différentes cultures. Toutefois, les prix sur le marché des cultures à faible rendement ne permettent généralement pas de rentabiliser l'utilisation des biofertilisants.

Étant donné que l'efficacité des biofertilisants dépend à la fois de facteurs agronomiques et environnementaux, il convient de sélectionner avec soin les produits et de suivre rigoureusement les

instructions du fabricant concernant leur application. Les biofertilisants constituent un outil précieux pour l'agriculture durable dans les régions arides où la production végétale est affectée par les stress abiotiques et la faible fertilité des sols. Avec l'extension probable des zones arides dans le monde, les biofertilisants pourraient présenter un intérêt croissant à l'avenir. De plus, ils peuvent (en partie) remplacer les engrais chimiques, réduisant ainsi les risques associés à la pollution du sol et les risques pour la santé humaine. En général, il est conseillé de tester un produit sur une petite zone avant une application large afin d'identifier les inoculants les plus efficaces et d'éviter des pertes économiques.

Les biotechnologies de la rhizosphère jouent un rôle croissant en agriculture alors que le secteur commence à reconnaître l'importance des micro-organismes pour la résilience des systèmes agricoles. Cette approche combine l'ajout d'inoculants microbiens performants et l'utilisation de pratiques agricoles et de variétés végétales spécifiques qui stimulent efficacement les micro-organismes fonctionnels et utiles dans la rhizosphère, ce qui a un impact favorable sur la fertilité des sols^[32,14]. Actuellement et au cours des années à venir, la recherche restera axée sur ces aspects et sur d'autres résultats afin d'identifier les méthodes culturales les plus performantes.



L'application de compost est une alternative intéressante pour promouvoir les micro-organismes indigènes du sol.

Références

- [1] R. Backer et al. «Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture». *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, p. 1473, 2018, doi: doi.org/10.3389/fpls.2018.01473.
- [2] G. J. Desbrosses und J. Stougaard. «Root Nodulation: A Paradigm for How Plant-Microbe Symbiosis Influences Host Developmental Pathways». *Cell Host Microbe*, vol. 10, no. 4, pp. 348–358, 2011, doi: 10.1016/j.chom.2011.09.005.
- [3] E. T. Alori und O. O. Babalola. «Microbial Inoculants for Improving Crop Quality and Human Health in Africa». *Front. Microbiol.*, vol. 9, p. 2213, 2018, doi: 10.3389/fmicb.2018.02213.
- [4] D. Trabelsi und R. Mhamdi. «Microbial Inoculants and Their Impact on Soil Microbial Communities: A Review». *Biomed Res. Int.*, vol. 2013, p. 863240, 2013, doi: 10.1155/2013/863240.
- [5] Peoples M.B., Herridge D.F. und Ladha J.K. «Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production?» *Plant Soil* 174: 3–28,1995.
- [6] M. B. Peoples und E. T. Craswell. «Biological nitrogen fixation: Investments, expectations and actual contributions to agriculture». *Plant Soil*, vol. 141, no. 1, pp. 13–39, 1992, doi: 10.1007/BF00011308.
- [7] A. D. Jnawali, R. B. Ojha und S. Marahatta. «Role of Azotobacter in soil fertility and sustainability – A Review». *Adv. Plants Agric. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 1–5, 2015.
- [8] S. Viscardi et al. «Assessment of plant growth promoting activities and abiotic stress tolerance of Azotobacter chroococcum strains for a potential use in sustainable agriculture». *J. soil Sci. plant Nutr.*, vol. 16, no. 3, pp. 848–863, 2016.
- [9] A. Van Dommelen und J. Vanderleyden. «Chapter 12 - Associative Nitrogen Fixation». H. Bothe, S. J. Ferguson, and W. E. B. T.-B. of the N. C. Newton, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2007, pp. 179–192.
- [10] P. Poole, V. Ramachandran und J. Terpolilli. «Rhizobia: from saprophytes to endosymbionts». *Nat. Rev. Microbiol.*, vol. 16, no. 5, pp. 291–303, 2018, doi: 10.1038/nrmicro.2017.171.
- [11] E. E. Chaia, L. G. Wall und K. Huss-Danell. «Life in soil by the actinorhizal root nodule endophyte Frankia. A review». *Symbiosis*, vol. 51, no. 3, pp. 201–226, 2010.
- [12] D. C. Roy, M. C. Pakhira und S. Bera. «A review on biology, cultivation and utilization of Azolla». *Adv. Life Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 11–15, 2016.
- [13] B. D. Kaushik. «Developments in cyanobacterial biofertilizers». In *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 2014, vol. 80, no. 2, pp. 379–388, doi: 10.16943/ptinsa/2014/v80i2/55115.
- [14] Smil V. «Phosphorous in the environment: natural Flows and Human Interferences». *Annu Rev Energy Env.* 2000;25(1):53–88.
- [15] Khan MS, Zaidi A, Wani PA, et al. «Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture». In *Sustainable Agriculture*. Edited by: Lictfouse E. Springer; 2009:552. DOI: 10.1007/978-90-481-2666-8_34
- [16] S. M. Kumar, G. C. Reddy, M. Phogat und S. Korav. «Role of biofertilizers towards sustainable agricultural development: a review». *J. Pharmacogn. Phytochem.*, vol. 7, no. 6, pp. 1915–1921, 2018.
- [17] Zörb C., Senbayram M., Peiter E., 2014. «Potassium in agriculture – status and perspectives». *J. Plant Physiol.* 171, 656–669
- [18] Sattar, A., Naveed, M., Ali, M., Zahir, Z. A., Nadeem, S. M., Yaseen, M., ... Meena, H. N. (2018). «Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: A review». *Applied Soil Ecology*. doi:10.1016/j.apsoil.2018.09.012
- [19] V. S. Meena et al. «Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): Isolation, identification, and K-release dynamics from waste mica». *Ecol. Eng.*, vol. 81, pp. 340–347, 2015, doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.065.
- [20] M. Saha, B. R. Maurya, V. S. Meena, I. Bahadur, and A. Kumar. «Identification and characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from Indo-Gangetic Plains of India». *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 7, pp. 202–209, 2016, doi: 10.1016/j.cbab.2016.06.007.
- [21] K. Prajapati und H. A. Modi. «Growth promoting effect of potassium solubilizing Enterobacter hormaechei (KSB-8) on cucumber (Cucumis sativus) under hydroponic conditions». *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci.*, vol. 3, no. 5, pp. 168–173, 2016.
- [22] S. Sheraz Mahdi et al. «Bio-fertilizers in Organic Agriculture». *J. Phytol.*, vol. 2, no. 10, Dec. 2010.
- [23] Parniske, M. «Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses». *Nat. Rev. Microbiol.* 6, 763–775, 2008.doi: 10.1038/nrmicro1987
- [24] A. Berruti, E. Lumini, R. Balestrini, and V. Bianciotto. «Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes». *Frontiers in Microbiology*, vol. 6, p. 1559, 2016, doi: 10.3389/fmicb.2015.01559.
- [25] N. S. Bolan. «A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants». *Plant Soil*, vol. 134, no. 2, pp. 189–207, 1991, doi: 10.1007/BF00012037.
- [26] I. C. Anderson and J. W. G. Cairney. «Ectomycorrhizal fungi: exploring the mycelial frontier». *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 31, no. 4, pp. 388–406, Jul. 2007, doi: 10.1111/j.1574-6976.2007.00073.x.
- [27] S. Perotto, M. Girlanda, and E. Martino. «Ericoid mycorrhizal fungi: some new perspectives on old acquaintances». *Plant Soil*, vol. 244, no. 1, pp. 41–53, 2002, doi: 10.1023/A:1020289401610.
- [28] K. Sathiyadash, T. Muthukumar, E. Uma, and R. R. Pandey. «Mycorrhizal association and morphology in orchids». *J. Plant Interact.*, vol. 7, no. 3, pp. 238–247, Sep. 2012, doi: 10.1080/17429145.2012.699105.
- [29] M. K. McCormick, D. Lee Taylor, K. Juhaszova, R. K. Burnett JR, D. F. Whigham, and J. P. O'Neill. «Limitations on orchid recruitment: not a simple picture». *Mol. Ecol.*, vol. 21, no. 6, pp. 1511–1523, Mar. 2012, doi: 10.1111/j.1365-294X.2012.05468.x.
- [30] S. L. Woo and O. Pepe. «Microbial Consortia: Promising Probiotics as Plant Biostimulants for Sustainable Agriculture». *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, p. 1801, 2018.
- [31] K. Brenner, L. You, and F. H. Arnold. «Engineering microbial consortia: a new frontier in synthetic biology». *Trends Biotechnol.*, vol. 26, no. 9, pp. 483–489, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.tibtech.2008.05.004.
- [32] K. Bradáčová, A. S. Florea, A. Bar-Tal, D. Minz, U. Yermiyahu, R. Shawahna, K. Dietel. «Microbial consortia versus single-strain inoculants: an advantage in PGPM-assisted tomato production?» *Agronomy*, 9(2), 105, 2019.
- [33] M. Schenck zu Schweinsberg-Mickan, and T.Müller. «Impact of effective microorganisms and other biofertilizers on soil microbial characteristics, organic-matter decomposition, and plant growth.» *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 172: 704–712, 2009, doi:10.1002/jpln.200800021
- [34] J. Mayer, S. Scheid, F. Widmer, A. Fließbach, H-R. Oberholzer «How effective are 'Effective microorganisms® (EM)'?». Results from a field study in temperate climate. *Applied Soil Ecology*, 46 (2): 230–239, 2010, doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.007.
- [35] A. F.C. Golec, P. González Pérez und L Chinmay «Effective microorganisms: myth or reality?». *Revista Peruana de Biología* 14.2 315–319,2007.
- [36] G. Colla und Y. Roupael. «Preface». in *Biostimolanti per un'agricoltura sostenibile. Cosa sono, come agiscono e modalità di utilizzo*, 2019.
- [37] I. Ortas. «Field trials on mycorrhizal inoculation in the eastern mediterranean horticultural regions». In *Mycorrhiza works: Proceedings of the International Symposium Mycorrhiza for Plant Vitality and the Joint Meeting for Working Groups 1–4 of COST Action 870*, Hannover, Deutschland, 3–5 Oktober, 2007, 2008, pp. 56–77.
- [38] D. V Pathak, M. Kumar und K. Rani. «Biofertilizer Application in Horticultural Crops». In *BT – Microorganisms for Green Revolution: Volume 1: Microbes for Sustainable Crop Production*, D. G. Panpatte, Y. K. Jhala, R. V Vyas, and H. N. Shelat, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 215–227.
- [39] S. D. Sharma, P. Kumar, S. K. Bhardwaj und S. K. Yadav. «Screening and selecting novel AM fungi and Azotobacter strain for inoculating apple under soil solarization and chemical disinfection with mulch practices for sustainable nursery management». *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 130, no. 1, pp. 164–174, 2011, doi: 10.1016/j.scienta.2011.06.032.
- [40] S. Symanczik, M. Gisler, C. Thonar, K. Schlaeppli, M. Van der Heijden, A. Kahmen, P. Mäder. «Application of Mycorrhiza and Soil from a Permaculture System Improved Phosphorus Acquisition in Naranjilla». *Frontiers in Plant Science*, 8(1263),2017, doi:10.3389/fpls.2017.01263

- [41] S. El Kinany, E. Achbani, M. Faggroud, L. Ouahmane, R. El Hilali, A. Haggoud and R. Bouamri. «Effect of organic fertilizer and commercial arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of micropropagated date palm cv. Feggouss». *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(4), 411–417, 2019.
- [42] M. Anli, S. Symanczik, A. El Abbassi, M. Ait-El-Mokhtar, A. Boutasknit, R. Ben-Laouane, A. Meddich, A. «Use of arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizoglyphus irregulare* and compost to improve growth and physiological responses of Phoenix dactylifera Boufgouss». *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2020, 1–9. doi:10.1080/11263504.2020.1779848
- [43] M. A. Wani, I. T. Nazki, A. Din, S. Iqbal, S. A. Wani und F. U. Khan. «Floriculture sustainability initiative: The dawn of new era». In *Sustainable Agriculture Reviews 27*, Springer, 2018, pp. 91–127.
- [44] K. Mukesh, S. K. Sharma, S. Sultan, D. S. Dahiya, S. Mohammed, und V. P. Singh. «Effect of farm yard manure and different biofertilizers on yield and nutrients content of marigold cv. Pusa Narangii». *Haryana J. Hortic. Sci.*, vol. 35, no. 3/4, pp. 256–257, 2006.
- [45] F. U. Khan, M. A. A. Siddique, F. A. Khan und I. T. Nazki. «Effect of biofertilizers on growth, flower quality and bulb yield in tulip (*Tulipa gesneriana*)». *Indian J. Agric. Sci.*, vol. 79, no. 4, pp. 248–251, 2009.
- [46] I. Weissenhorn und C. R. Külling. «Real case applications of commercial mycorrhiza products in the Netherlands: Prove us that mycorrhiza works and we will use it». In *Mycorrhiza works: Proceedings of the International Symposium Mycorrhiza for Plant Vitality and the Joint Meeting for Working Groups 1–4 of COST Action 870*, Hannover, Deutschland, 3–5 Oktober, 2007/08, p. 17.
- [47] S. Zimmer, M. Messmer, T. Haase, H.-P., Piepho, A. Mindermann, H. Schulz, J. Heß. «Effects of soybean variety and Bradyrhizobium strains on yield, protein content and biological nitrogen fixation under cool growing conditions in Germany.» *European Journal of Agronomy*, 72, pp. 38–46, 2016.
- [48] K. Mohammadi und Y. Sohrabi. «Bacterial biofertilizers for sustainable crop production: a review». *Asian Res. Publ. Netw.*, vol. 7, no. 5, pp. 307–316, 2012.
- [49] S. P. Wani. «Inoculation with associative nitrogen-fixing bacteria: Role in cereal grain production improvement». *Indian J. Microbiol.*, vol. 30, no. 4, pp. 363–393, 1990.
- [50] A. A. Belimov, A. P. Kojemiakov und C. nV Chubarliyeva. «Interaction between barley and mixed cultures of nitrogen fixing and phosphate-solubilizing bacteria». *Plant Soil*, vol. 173, no. 1, pp. 29–37, 1995.
- [51] N. Mathimaran, J. Sekar, T.M.Nanjundegowda, P. V. Ramalingam, Y. Perisamy, K.Raju, [..], S. Ayappa. «Intercropping transplanted pigeon pea with finger millet: Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria boost yield while reducing fertilizer input». *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 88, 2020.
- [52] P. Mäder, F. Kaiser, A. Adholeya, R.Singh, H.S. Uppal, A. K. Sharma, [..], P. M. Fried. «Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat-rice and wheat-black gram rotations in India.» *Soil Biology and Biochemistry*, 43(3), 609–619, 2011.
- [53] K. Turnau und K. Haselwandter. «Arbuscular mycorrhizal fungi, an essential component of soil microflora in ecosystem restoration.» *Mycorrhizal technology in agriculture* (pp. 137–149): Springer, 2002.
- [54] P. Jeffries, A., Craven-Griffiths, J.M., Barea, Y. Levy und J.C. Dodd. «Application of arbuscular mycorrhizal fungi in the revegetation of desertified Mediterranean ecosystems.» *Mycorrhizal technology in agriculture* (pp. 151–174): Springer, 2002
- [55] F. Wang. «Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in mining-impacted sites and their contribution to ecological restoration: Mechanisms and applications.» *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(20), 1901–1957, 2017.
- [56] L. Schütz et al. «Improving Crop Yield and Nutrient Use Efficiency via Biofertilization – A Global Meta-analysis». *Frontiers in Plant Science*, vol. 8. p. 2204, 2018, doi: doi.org/10.3389/fpls.2017.02204.
- [57] I. Romano, V. Ventorino und O. Pepe. «Effectiveness of Plant Beneficial Microbes: Overview of the Methodological Approaches for the Assessment of Root Colonization and Persistence». *Frontiers in Plant Science*, vol. 11. p. 6, 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.00006.
- [58] Y. Bashan, L. E. de-Bashan, S. R. Prabhu und J.-P. Hernandez. «Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013)». *Plant Soil*, vol. 378, no. 1, pp. 1–33, 2014, doi: 10.1007/s11104-013-1956-x.
- [59] N. K. Arora, E. Khare und D. K. Maheshwari. «Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Constraints in Bioformulation, Commercialization, and Future Strategies». In *Plant Growth and Health Promoting Bacteria*, D. K. Maheshwari, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 97–116.
- [60] E. Malusá, L. Sas-Paszat und J. Ciesielska. «Technologies for Beneficial Microorganisms Inocula Used as Biofertilizers». *Sci. World J.*, vol. 2012, p. 491206, 2012, doi: 10.1100/2012/491206.
- [61] T. Mahanty et al. «Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development». *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, pp. 3315–3335, 2017, doi: 10.1007/s11356-016-8104-0.
- [62] C. A. Morgan, N. Herman, P. A. White und G. Vesey. «Preservation of micro-organisms by drying: A review». *J. Microbiol. Methods*, vol. 66, no. 2, pp. 183–193, 2006, doi: 10.1016/j.mimet.2006.02.017.
- [63] Hegde, S.V. «Liquid bio-fertilizers in Indian agriculture». *Biofertilizer newsletter*, pp.17–22, 2008.
- [64] L. Corkidi et al. «Assessing the infectivity of commercial mycorrhizal inoculants in plant nursery conditions». *J. Environ. Hortic.*, vol. 22, no. 3, pp. 149–154, Sep. 2004, doi: 10.24266/0738-2898-22.3.149.
- [65] L. Xu und G. Danny. «Developing biostimulants from agro-food and industrial by-products.» *Front. Plant Sci.*, vol. 9, p. 1567, 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.01567.
- [66] M. Lori, S. Symanczik, P. Mäder, G. De Deyn, and A. Gatteringer. «Organic farming enhances soil microbial abundance and activity – A meta-analysis and meta-regression». *PLoS One*, vol. 12, no. 7, p. e0180442, Jul. 2017.
- [67] J.G. Fuchs. «Composting process management and compost benefits for soil fertility and plants.» *Acta Horticulturae*. 1164., 195–202, 2017.
- [68] T. Oberhaensli, V. Hofer, L. Tamm, J.G Fuchs, M. Koller, J. Herforth-Rahmé, M. Maurhofer, B. Thuerig. «*Aeromonas media* in compost amendments contributes to suppression of *Pythium ultimum* in cress.» *Acta Horticulturae*. 1164., 353–360, 2017.
- [69] N. Moradtalab, F. Freytag, S. Wanke, G. Neumann. *Proceedings of the 18th International Plant Nutrition Colloquium 2017*, Copenhagen, Denmark. 175–176, 2017.

Impressum

Éditeur: Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL
Ackerstrasse 113, case postale 219, 5070 Frick, Suisse
Tél. +41 62 865 72 72
info.suisse@fibl.org, fibl.org

Auteur-es: Sarah Symanczik (FiBL), Paul Mäder (FiBL), Ida Romano (FiBL, University Neapel Federico II)

Collaboration: Bernhard Speiser (FiBL), Günther Neumann (Universität Hohenheim)

Rédaction: Lauren Dietemann, Simona Moosmann (tous deux du FiBL)

Traduction française: Bérengère Letessier

Mise en page: Sandra Walti (FiBL)

Photos: Sarah Symanczik (FiBL) S.3(3), 4(1,2), 5(1,2) Monika Messmer (FiBL) S.3 (1,2), Jacques Fuchs (FiBL) S.12, Günter Neumann (Universität Hohenheim) S.9, Christine Arnken (FiBL) S.7, Andreas Basler (FiBL) S.5., Ida Romano (FiBL, Università Neapel Federico II) S.2, Dominika Kundel (FiBL) S.11

Numéro d'article du FiBL: 1240 **DOI:** 10.5281/zenodo.7428682

Cette fiche technique peut être téléchargée gratuitement depuis la boutique du FiBL: shop.fibl.org.

Toutes les parties de cette publication sont protégées par le droit d'auteur. Toute utilisation est interdite sans le consentement de l'éditeur. Cela vaut en particulier pour les duplications, les traductions, les microfilms, le stockage et le traitement dans des systèmes électroniques.

1^{re} édition 2022 © FiBL