



HAL
open science

Fertilité biologique des sols : des microorganismes utiles à la croissance des plantes

Claude Alabouvette, Christelle Cordier

► **To cite this version:**

Claude Alabouvette, Christelle Cordier. Fertilité biologique des sols : des microorganismes utiles à la croissance des plantes. Innovations Agronomiques, 2018, 69, 10.15454/UIJG8L . hal-02058232

HAL Id: hal-02058232

<https://hal.science/hal-02058232>

Submitted on 5 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Fertilité biologique des sols : des microorganismes utiles à la croissance des plantes

Alabouvette C.¹ et Cordier C.¹

¹ AGRENE, 47 rue Constant Pierrot, F-21110 Breteniere

Correspondance : c.ala@agrene.fr

Résumé

Le sol héberge une grande diversité de communautés microbiennes qui interagissent entre elles et qui, dans la rhizosphère, interagissent aussi avec les racines des plantes. Les activités de certaines populations microbiennes peuvent être bénéfiques à la croissance des plantes. Ces microorganismes utiles peuvent constituer des associations symbiotiques comme c'est le cas entre les légumineuses et des bactéries fixatrices d'azote ou entre les champignons mycorhizogènes de l'ordre des Glomales et de nombreuses espèces végétales. D'autres microorganismes dits « libres » possèdent aussi la capacité de favoriser la croissance des plantes, en solubilisant des nutriments non ou peu disponibles dans le sol, mais aussi en libérant dans la rhizosphère des substances de croissance de type hormonal. Depuis une dizaine d'année l'industrie des « biostimulants » a mis sur le marché un grand nombre de produits à base de microorganismes bénéfiques, bactéries ou champignons, libres ou symbiotiques. Leur efficacité dépend de nombreux facteurs parmi lesquels, la culture, le type de sol, la qualité du produit et le mode d'application jouent un rôle prépondérant.

Mots-clés : Rhizosphère ; Biostimulants ; Biofertilisants ; Microorganismes libres ; Microorganismes symbiotiques ; Mycorhize ; *Rhizobium*, *Bacillus* ; *Pseudomonas*, *Trichoderma*

Abstract : Biofertilizers : microorganism which improves the growth of plants?

A large diversity of microbial communities exists in soil. In the rhizosphere, these microbial populations interact among themselves, and with plant roots. Some microorganisms have the capacity to improve plant growth. Bacteria such as nitrogen-fixing Rhizobia and fungi belonging to the order Glomales form symbiotic associations with plant roots. In addition free living microorganisms such as *Pseudomonas*, *Bacillus* or *Trichoderma* are also able to promote plant growth through different mechanisms such as increasing the bioavailability of soil-borne nutrients, secreting hormones etc. The biostimulant Industry has created many diverse products containing growth promoter microorganisms, bacteria and fungi, free living or symbiotic that are now available on the market. Their efficacy depends on many factors especially on the crop, the soil type, the product quality and the mode of application.

Keywords : Rhizosphere ; Biofertilizers ; Free living microorganisms ; Symbiotic microorganisms ; Mycorrhiza ; *Rhizobium*, *Bacillus* ; *Pseudomonas* ; *Trichoderma*

1. Fertilité biologique des sols

Avant d'aborder plus spécifiquement le rôle des microorganismes favorisant la croissance et/ou le développement des plantes, il convient de tenter de définir ce qu'est la fertilité biologique des sols.

Si l'on interroge le net nous trouvons de nombreuses définitions de la fertilité des sols. Plusieurs auteurs s'accordent à penser qu'il est impossible de proposer une définition acceptable par tous, car

elle serait trop vague. Nous en avons choisi une qui est celle-ci : la **fertilité du sol** est une composante de la productivité biologique du sol s'intéressant à son état en matière de disponibilité en éléments nutritifs, et à sa capacité à fournir les éléments nutritifs à partir de ses propres réserves pour la production des cultures et, enfin, à ses réactions concernant les apports externes d'éléments nutritifs. Son évaluation est utile pour décider des doses d'application d'engrais, ce qui est la fonction principale des laboratoires d'analyse du sol. Les engrais sont nécessaires si la fertilité du sol est faible et inadaptée à maintenir un niveau désiré de production des plantes. L'application d'engrais a pour objectif d'augmenter la fertilité biologique du sol».

Cette définition fait donc essentiellement référence aux éléments nutritifs disponibles et à la nécessité d'en apporter sous forme d'engrais si les résultats d'analyses physicochimiques signalent de potentielles carences en certains éléments. Mais curieusement, dans la dernière phrase, il est fait référence à la fertilité biologique sans en préciser la définition. .

Il est intéressant de noter que si nous avons trouvé quelques références à la qualité biologique des sols (Chaussod, 1996), la fertilité biologique ne fait pas l'objet d'articles universitaires. Sur le web et comme pour la fertilité, nous trouvons plusieurs définitions de la fertilité biologique la plus courte étant celle-ci : La **fertilité biologique** est « une aptitude d'un substrat, d'un sol, à fournir naturellement, par les cycles biologiques les éléments fertilisants pour la croissance des végétaux ».

De notre point de vue cette définition n'est pas très explicite mais en continuant nos recherches nous trouvons une définition beaucoup plus complète et plus satisfaisante.

La **fertilité biologique** est « une aptitude des sols à apporter les éléments essentiels (azote, phosphore et potassium principalement) à la croissance des végétaux par l'action des organismes vivants (animaux, insectes, champignons, parasites) ayant des inter-relations complexes et qui se nourrissent de débris végétaux ou animaux. L'ensemble de ces organismes contribuent à la dégradation de la matière organique qui entraîne la libération des éléments nutritifs nécessaires à la plante. Une fraction de la matière organique, facilement dégradable, participe à la fertilité du sol en nourrissant la biomasse microbienne qui elle-même participe à la nutrition des plantes en azote, phosphore... Une autre fraction dite « stable » a un rôle de structuration du sol. L'équilibre du ratio entre dégradation et stabilisation de la matière organique détermine la fertilité biologique des sols.

La principale critique que nous ferons à cette définition est de ne citer que des éléments nutritifs majeurs alors que la vie microbienne des sols est essentielle aux cycles de certains oligo-éléments comme le fer, le manganèse et bien d'autres. Mais cette définition met en exergue le rôle central joué par les communautés microbiennes dont l'activité contribue de manière importante à la fourniture à la plante des éléments indispensables à son développement.

2. La rhizosphère

Dans la définition de la fertilité biologique citée ci-dessus, il est dit que les organismes vivants se nourrissent de débris végétaux ou animaux. Cela est exact, mais incomplet car de nombreux microorganismes utilisent les éléments nutritifs émis par la plante dans la rhizosphère. Il est donc indispensable de définir ce terme. La rhizosphère correspond au volume de sol soumis à l'influence des racines de la plante. C'est le lieu des interactions principales entre la plante et les microorganismes telluriques d'une part et des interactions entre microorganismes eux-mêmes. La distance à laquelle la racine d'une plante affecte les activités microbiennes est extrêmement variable, elle dépend du type de sol, de l'espèce végétale et des activités microbiennes considérées. La racine de la plante modifie très largement certaines caractéristiques du sol : pH, potentiel hydrique, potentiel d'oxydo-réduction, et apporte, via les exsudats racinaires, de nombreux éléments, en particuliers des sucres et des acides organiques, qui stimulent les activités microbiennes et leurs interactions.

Dans la rhizosphère les microorganismes peuvent être libres ou étroitement associés aux racines, l'association la plus stricte étant celle de la symbiose qui caractérise d'une part les relations entre les légumineuses et les rhizobiacées, bactéries fixatrices d'azote et d'autres part les relations entre les glomales, champignons formant des mycorhizes avec de très nombreuses espèces végétales.

Parmi les microorganismes libres vivant dans la rhizosphère, on trouve aussi bien des organismes bénéfiques à la croissance tels que les bactéries dites « PGPR » pour Plant Growth Promoting Bacteria, que des organismes délétères ou pathogènes. Le groupe des *Pseudomonas* fluorescent offre de multiples exemples de bactéries bénéfiques mais aussi de bactéries délétères. Du côté des champignons, le genre *Trichoderma* regroupe un grand nombre d'espèces à activité bénéfique à la croissance de la plante, alors que les genres *Fusarium* ou *Phytophthora* présentent de nombreuses espèces pathogènes pour les plantes.

Ces quelques exemples qui seront détaillés plus loin, montrent comment les microorganismes, indépendamment de leur rôle dans la dégradation des résidus végétaux participent à la fertilité biologique des sols.

3. Comment favoriser la fertilité biologique des sols ?

Deux approches complémentaires sont possibles : (i) utiliser des méthodes qui vont stimuler *in situ* l'activité des microorganismes bénéfiques (ii), introduire massivement des microorganismes préalablement sélectionnés pour leurs activités bénéfiques.

La première approche est celle qui est privilégiée dans le cadre de l'agro-écologie. Elle fait appel à un ensemble de méthodes et de moyens qui concourent à préserver, voire augmenter la diversité des communautés microbiennes, à préserver la teneur en matières organiques des sols, etc. Cela passe par un allongement des rotations, le choix de techniques de travail du sol moins perturbantes qu'un labour profond, la culture de plantes hébergeant une microflore utile telles que les légumineuses et leur association symbiotique avec les rhizobiacées, des apports de matières organiques etc... Il conviendrait de consacrer un chapitre spécial dédié à cette approche. Mais dans le cadre de cet article nous nous limiterons à la seconde approche celle qui fait appel à l'apport de « biostimulants »

4. Les biostimulants

Comme nous l'avons signalé plus haut la rhizosphère des plantes est un lieu d'intense activité microbienne, car la plante, via ses exsudats, libère à la fois des sucres et des acides aminés qui lèvent la microbiostase qui caractérise l'état des microorganismes dans un sol « au repos ». Il a été bien démontré que, dans le sol, en absence d'éléments nutritifs exogènes, les champignons sont soumis à la mycostase, phénomène qui les maintient à l'état de repos végétatif, le plus souvent sous forme sporulée, mais aussi sous forme de mycélium inactif. Remis en activité dans la rhizosphère des plantes, les microorganismes interagissent entre eux et avec la racine des plantes. Lorsqu'il s'agit de microorganismes pathogènes, champignons ou bactéries, sans parler des nématodes, l'interaction avec la plante se traduit par le développement de symptômes plus ou moins graves qui peuvent conduire à la mort de la plante. Mais il existe aussi des interactions bénéfiques qui peuvent se traduire par une stimulation de croissance de la plante et par une meilleure résistance de la plante aux stress d'origine diverse.

Depuis une vingtaine d'années, avec une accélération récente, on a vu apparaître sur le marché des produits ayant une revendication de « biostimulation » de la croissance des plantes ou de « biofertilisation ». Parmi ces produits les microorganismes tiennent une place importante, mais ils ne sont pas les seuls. Il est donc nécessaire de préciser ce que sont les produits biostimulants.

4.1 Qu'est-ce qu'un biostimulant ?

La définition proposée par l'EBIC (European Biostimulants Industry Council) est la suivante : les biostimulants des plantes contiennent une ou des substances ou microorganismes dont la fonction est, après application à la plante ou dans la rhizosphère, de stimuler les processus naturels pour stimuler ou augmenter l'absorption des éléments nutritifs, leur efficacité, la tolérance aux stress abiotiques, et la qualité des récoltes. Les biostimulants n'ont pas d'action directe vis-à-vis des agents pathogènes et de ce fait ne tombent pas sous le coup de la réglementation des pesticides.

J. Kloepper, professeur à Auburn University qui est un des premiers chercheurs à avoir travaillé sur les PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), est le co-auteur d'un article important qui fait le point sur les données scientifiques relatives aux bio-stimulants (Calvo, 2014). Il fait remarquer le contraste qui prévaut dans l'approche suivie pour développer d'une part des microorganismes agents de protection des plantes et d'autre part des produits biostimulants. Dans le 1^{er} cas de nombreuses recherches scientifiques ont été réalisées en amont des tentatives d'application dans le second cas, ce sont les applications pratiques qui ont précédé le travail de recherche qui se heurtait au scepticisme d'un grand nombre de scientifiques.

Dans cet article Kloepper considère 4 grandes catégories de bio-stimulants : 1/ les microorganismes (bactéries et champignons) ; 2/ les acides humique et fulvique ; 3/ les hydrolysats de protéines et mélanges d'acides aminés ; 4/ les extraits d'algue.

Il doit être clair qu'en focalisant notre propos sur les microorganismes, nous ne traitons qu'un aspect du problème de la fertilité biologique des sols.

4.2 Les microorganismes biostimulants

Comme indiqué ci-dessus, c'est au tout début des années 80, que des chercheurs, pathologistes pour la plupart, ce sont intéressés aux bactéries colonisant la rhizosphère et/ou le rhizoplan des plantes. Ils ont démontré que certaines de ces bactéries appartenant, pour la plupart, au groupe des *Pseudomonas* fluorescents avaient non seulement des aptitudes antagonistes vis-à-vis d'agents pathogènes, mais aussi la capacité à stimuler la croissance de certaines plantes. C'est à cette époque qu'a été forgée, l'appellation PGPR pour Plant Growth Promoting Rhizobacteria. C'est également à cette époque que ce sont intensifiées les recherches relatives aux associations symbiotiques entre la racine des plantes et d'une part des bactéries fixatrices d'azote, les rhizobiacées, d'autre part des champignons capables de former des mycorhizes à arbuscules et appartenant au groupe des Glomales

4.3 Les associations symbiotiques

Pour nous, en France le premier exemple bien documenté de l'usage d'une bactérie bénéfique à la croissance est celui de l'inoculation du soja avec une souche efficiente de *Bradyrhizobium japonicum*. Les légumineuses ont développé une stratégie d'acquisition de l'azote indispensable à leur croissance, en s'associant à des bactéries fixatrices d'azote qui forment sur les racines des nodosités caractéristiques. La bactérie utilise l'énergie et le carbone résultant de la photosynthèse de la plante et fixe l'azote atmosphérique, qui pourra être utilisé par la plante sous forme ammoniacale. Les mécanismes d'infection de la racine par les bactéries ont fait l'objet d'importants travaux de recherche qui ont permis de montrer que la première étape de l'interaction est caractérisée d'une part par une déformation des poils absorbants auxquels viennent se fixer les bactéries et d'autre part par un échange de signaux moléculaires entre la plante et les bactéries, ces dernières produisant des lipochito-oligosaccharides appelés facteurs Nod. Reconnus par la plante à des concentrations extrêmement faibles de l'ordre du nano- au picomolaire, ces facteurs Nod déterminent la reconnaissance spécifique entre l'espèce végétale et l'espèce bactérienne. En effet, comme dans le

cas des agents pathogènes, il existe une spécificité d'espèce, c'est-à-dire que différentes espèces de légumineuses forment des associations symbiotiques avec différentes espèces de *Rhizobium*.

La principale application de ces connaissances, en Europe est l'inoculation du soja par une souche de *Bradyrhizobium japonicum*. Le soja n'étant pas originaire du continent européen, les sols français étaient dépourvus de l'espèce de *Bradyrhizobium* capable de former des nodosités avec la racine de soja. Pour développer la culture de cette légumineuse, sans avoir à apporter une fertilisation azotée, il a fallu introduire une souche de bactérie fixatrice d'azote. Un travail de sélection de souches efficaces a été réalisé à Dijon, de même que le développement de la technologie permettant la multiplication en fermenteur de la souche sélectionnée et la mise au point des modalités d'application aux semences. Bien que *Bradyrhizobium* soit capable de survivre dans les sols préalablement inoculés, il est préférable, pour assurer une bonne colonisation des racines, d'inoculer les semences avant chaque nouvelle culture. Il a également été proposé d'associer, dans une même préparation, facteurs Nod et souche de *Rhizobium* pour favoriser la nodulation des plantes. A notre connaissance ce type de préparation proposée aux Etats Unis n'est pas disponible en France.

Aujourd'hui plusieurs sociétés commercialisent non seulement un inoculum destiné à la culture du soja, mais aussi des inoculums destinés à d'autres cultures de légumineuses, comme la luzerne. Dans ce cas, il s'agit non pas d'introduire une espèce bactérienne inexistante dans les sols français, mais de favoriser la colonisation des racines par des souches plus efficaces que les souches autochtones qui préexistent dans les sols.

Le second exemple est celui des champignons endo-mycorhizogènes. Ces champignons appartenant au groupe des glomales sont capables de coloniser les racines de très nombreuses espèces végétales, plantes annuelles et plantes ligneuses. Contrairement à d'autres microorganismes, ces champignons sont incapables de se développer dans le sol, en absence des racines d'une plante-hôte. Ils se conservent dans les sols sous forme de spores au repos qui ne germeront qu'à proximité immédiate d'une racine. Le tube germinatif adhère à la racine puis y pénètre pour former un réseau d'hyphes intracellulaires qui forment ce que l'on appelle des arbuscules. Ces arbuscules où la membrane plasmique de la cellule végétale est au contact de la membrane du champignon constituent une grande surface d'échanges entre la racine et le champignon. Comme dans l'exemple précédent, la plante fournit l'énergie via la photosynthèse et le champignon apporte un certain nombre d'éléments minéraux, en particulier du phosphore présent dans les sols sous une forme non directement assimilable par la plante. A partir de la racine mycorhizée, le champignon développe dans le sol un dense réseau d'hyphes qui contribuent à augmenter considérablement le volume de sol exploré par les racines de la plante. Ce ne sont pas uniquement des éléments minéraux mais aussi des ressources hydriques qui sont mises à la disposition de la plante via ce réseau. C'est pourquoi les champignons mycorhizogènes contribuent à aider la plante à résister à des stress abiotiques et en particulier à la sécheresse. Comme dans le cas de la symbiose légumineuses/ rhizobiacées, il existe un dialogue moléculaire entre la plante et le champignon qui fait appel à des molécules appelés Myc qui sont, comme les facteurs Nod, des lipochito-oligosaccharides. Il existe donc, au niveau moléculaire, de grandes similitudes entre ces deux types de relations symbiotiques qui concernent des espèces végétales et des microorganismes très différents.

Pour être complet, il faut citer également les associations symbiotiques entre certaines espèces végétales et des bactéries actinomycètes. Les actinorhizes sont des nodosités fixatrices d'azote qui se forment au niveau des racines de certaines espèces végétales dites actinorhiziennes. Ce sont principalement des arbres ou des arbustes tels que l'aulne et des espèces appartenant à la famille des Ericacées et des *Elaeagnaceae* qui forment ce type de nodosités avec des bactéries filamenteuses appartenant au genre *Frankia*.

4.4 Les microorganismes libres

Comme il vient d'être rappelé ci-dessus, la mise sur le marché de produits biostimulants à base de microorganismes « bénéfiques » à la croissance des plantes a précédé les recherches concernant ces microorganismes et leurs modes d'action. Il convient de préciser dès maintenant que les premiers produits biostimulants, mis sur le marché étaient à base de *Pseudomonas*, *Bacillus* et *Trichoderma*, (Alabouvette et Cordier, 2012, 2013, 2015), bactéries et champignons déjà bien connus pour leurs propriétés antagonistes d'agents pathogènes. Les recherches qui leur étaient consacrées visaient à comprendre leur mode d'action antagoniste, ce qui explique, en partie, le manque d'intérêt des chercheurs pour leur capacité à promouvoir la croissance des plantes. Il est évident que lorsque l'activité antagoniste s'exerce dans la rhizosphère à l'encontre d'organismes pathogènes ou délétères, la résultante visible au-dessus de la surface du sol est une meilleure croissance des plantes. Il a donc fallu attendre les premiers résultats montrant un effet direct de ces organismes sur la croissance des plantes pour stimuler les recherches sur les mécanismes de biostimulation.

Aujourd'hui, comme il a été signalé ci-dessus, la réglementation européenne établit une distinction nette entre microorganismes utilisés pour lutter contre des agents pathogènes et les microorganismes biostimulants. Les premiers sont considérés comme des produits phytosanitaires et sont évalués selon les mêmes critères que les pesticides de synthèse, alors qu'il n'existe pas de réglementation européenne pour les biostimulants dont la mise sur le marché est réglementée au niveau national. Si ces deux catégories de produits : produits phytosanitaires d'une part, biostimulants d'autre part est claire au niveau réglementaire, elle ne l'est pas au niveau des modes d'action de ces deux types de microorganismes. En effet plusieurs modes d'action clairement identifiés concourent à la fois aux aptitudes antagonistes et à la stimulation de croissance.

Avant de présenter un certain nombre de produits actuellement disponibles ou en développement, nous allons tenter de présenter de manière synthétique les principaux modes d'action qui confèrent leur propriété biostimulante à certains microorganismes, bactéries ou champignons, actifs dans la rhizosphère des plantes.

La fixation d'azote atmosphérique pour mettre à la disposition des plantes de l'azote sous une forme assimilable ne concerne pas que des bactéries symbiotiques. Des espèces bactériennes appartenant aux genres *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella* ou *Burkholderia* spp présentent la capacité à fixer l'azote. Des souches appartenant à ces genres bactériens sont développées en tant que biostimulants dans différents pays, certains produits étant disponibles sur le marché.

Une des principales revendications concernant les champignons symbiotiques est l'amélioration de la nutrition phosphatée car ils produisent différents types de phosphatases entraînant la solubilisation du phosphore présent dans le sol sous des formes inaccessibles aux plantes. Mais la solubilisation du phosphore n'est pas l'apanage des champignons mycorhizogènes. De très nombreux microorganismes, bactéries et champignons, augmentent la disponibilité du sol en éléments minéraux en augmentant leur solubilisation, favorisant ainsi leur absorption par la plante. Deux types de mécanismes prévalent : la production de phosphatases et la production d'acides organiques qui abaissant le pH du sol favorisent la libération des ions phosphate. De nombreux types d'acides organiques différents sont produits par des espèces microbiennes différentes parmi lesquelles il convient de citer les *Bacillus licheniformis* et *amyloliquefasciens*, mais aussi les *Pseudomonas* spp. , *Burkholderia cepacia* etc.

D'autres éléments minéraux, macro- ou micro-éléments essentiels à la croissance des plantes sont également solubilisés par des bactéries et des champignons du sol ; le potassium, le zinc, le cuivre le manganèse etc. Les bactéries et en particulier les *Pseudomonas* du groupe des *Pseudomonas* fluorescents ont développé des systèmes d'acquisition et de transport du fer qui leur permettent de se développer dans des milieux très pauvres en fer. Les sidérophores qui chélatent le fer contribuent à la nutrition ferrique des plantes comme cela a été bien démontré dans le cas de la tomate et du riz.

Plus récemment a été mise en évidence la production, par les microorganismes, de phytohormones telles que des auxines, des cytokinines des gibbérellines ou de l'éthylène. Ces hormones identiques ou analogues aux phytohormones produites par les plantes sont clairement impliquées dans la stimulation de croissance ou de développement de la plante ou de certains organes de la plante.

Les travaux les plus récents consacrés aux modes d'action des *Trichoderma* spp. montrent des interactions très complexes au niveau moléculaire entre la plante et le champignon. Ce sont plusieurs centaines de gènes dont l'expression est modifiée dans la plante en réponse à l'inoculation avec une souche de *Trichoderma* (Woo, 2006).

Il faut admettre que nous sommes très loin d'une bonne connaissance des modes d'action par lesquels les microorganismes stimulent la croissance des plantes. De plus, contrairement à ce qui est exigé pour les agents de biocontrôle, la réglementation n'exige pas la mise en évidence des modes d'action, l'autorisation de mise sur le marché se base sur la démonstration de l'absence d'effets néfastes et de l'efficacité.

5. Efficacité des biostimulants

Bien que le marché des microorganismes biostimulants soit en forte augmentation, tous les problèmes liés à leur production, formulation et mode d'application sont loin d'être résolus. Comme c'est le cas pour les microorganismes de biocontrôle, il convient de commercialiser des organismes vivants capables, après application, d'exprimer les propriétés bénéfiques pour lesquelles ils ont été sélectionnés. Cette contrainte nécessite des procédés de production et de formulation adaptés à chaque type de microorganisme. Bactéries comme champignons peuvent être produits par fermentation en milieu liquide ou en milieu solide, à condition que les paramètres de culture soient optimisés pour assurer une forte densité de microorganismes et un « état physiologique » permettant leur survie. Il en est de même des procédés de formulation qui doivent permettre la survie des microorganismes, pendant les phases de stockage, de transport et d'application.

Dans la majorité des produits disponibles, les microorganismes sont formulés avec une maltodextrine qui assure leur conservation et leur remise en activité après application au sol. Mais les modes d'application n'ont pas réellement été optimisés. En effet la plupart des biostimulants sont appliqués uniformément sur toute la surface des parcelles alors que c'est dans la rhizosphère des plantes qu'ils doivent manifester leur activité bénéfique. Une localisation plus précise dans la raie de semis ou par enrobage des semences serait de nature à améliorer leur efficacité tout en diminuant les doses d'apport.

6. Quelques exemples de produits biostimulants actuellement sur le marché

La mise sur le marché des produits biostimulants est, en France, soumise à une autorisation délivrée par l'ANSES sous la rubrique « Matières Fertilisantes et Supports de Culture (MFSC) ». L'obtention de cette autorisation repose sur l'examen par l'ANSES d'un dossier très complet répondant à des exigences précises relatives à l'identité des microorganismes concernés, à l'absence de toxicité du produit vis-à-vis de l'homme de l'animal et de l'environnement ainsi qu'à des critères de qualité du produit : titre en microorganismes garanti, absence de contaminants microbiens, constance et homogénéité de la production. Enfin, l'efficacité de la biostimulation doit être vérifiée dans des essais conduits en laboratoire, en serres ou au champ.

La liste de tous les produits autorisés est consultable sur le site E-phy de l'Anses.

Le Tableau 1 donne un aperçu de quelques produits disponibles sur le marché français.

Tableau 1 : Aperçu de quelques produits disponibles sur le marché français

Fournisseur	Produit	Champignons	Bactéries
Actura	Resid MG	Champignons endomycorhizogènes	
Agrifutur	Nitrogen		<i>Bradyrhizobium japonicum</i>
Agrostar	Baci Start M4		<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>
BASF	Rhizoflo soja		<i>Bradyrhizobium japonicum</i>
Biovitis	Cérès Carpoes Heles	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Trichoderma harzianum</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Bacillus methylophilus</i>
Cybele Agro Care	Bacteriolis Rhizobacteriolis		<i>Pseudomonas fulva</i> <i>Pseudomonas fulva</i> + <i>Pseudomonas fluorescens</i>
Compo expert	Agrosil turf Argin		<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>
De Sangosse	Rizoliq Top		<i>Bradyrhizobium japonicum</i>
FCA	Mycosol	<i>Coniothyrium minitans</i> + <i>Trichoderma asperellum</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i> + <i>Pseudomonas putida</i>
Fertemis	Fertevie Rhiz		<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>
Elephant vert	Ovalis rhizofertil		<i>Pseudomonas putida</i>
Gaiago SAS	Free PK		<i>Bacillus mucilaginosus</i>
If Tech	Mycor	Champignon endomycorhizogène	
Inoculum Plus	Symbivit	Champignons endomycorhizogènes	
Italpollina	CONDOR	Champignon endomycorhizogène + <i>Trichoderma atroviride</i>	Bactérie de la rhizosphère
Italpollina	TEAM Horto	Champignon endomycorhizogène + <i>Trichoderma atroviride</i> + <i>Glomus mosseae</i>	Bactérie de la rhizosphère
Italpollina	TEAM Enrobage	Champignon endomycorhizogène + <i>Trichoderma atroviride</i> + <i>Glomus mosseae</i>	Bactérie de la rhizosphère
Italpollina	TIFI	<i>Trichoderma atroviride</i> + <i>Glomus spp.</i>	Bactérie de la rhizosphère
Lallemand Plant Care	Rhizocell		<i>Bacillus amyloliquefaciens sp.</i>
Plantworks	Root grow	Champignons endomycorhizogènes	
Premier Tech GHA	Myke Pro	Champignon endomycorhizogène	

Conclusion

Bien que l'on assiste au cours des dernières années à une augmentation du nombre de produits à base de microorganismes mis sur le marché, il est clair que de gros efforts de recherche sont encore nécessaires pour améliorer l'utilisation de microorganismes bénéfiques à la croissance des plantes. Il faut bien admettre que seul un tout petit nombre de genres et d'espèces fait l'objet de développement alors qu'il existe une grande diversité de communautés microbiennes dans la rhizosphère des plantes. Il convient donc de s'intéresser à d'autres groupes microbiens et d'approfondir les recherches visant à comprendre les modes d'actions de ces microorganismes.

Enfin, comme il a été déjà signalé plus haut, l'apport de microorganismes sélectionnés n'est qu'une des approches permettant d'augmenter la fertilité biologique des sols. Le choix de méthodes agronomiques ou culturales visant à stimuler in situ l'activité de la microflore autochtone bénéfique à la croissance des plantes constitue une autre approche, tout aussi si non plus prometteuse que l'introduction de microorganismes exogènes.

Références bibliographiques

- Alabouvette C., Cordier C., 2012. Les Trichoderma, trois fois bénéfiques? Bio-protectants, bio-fertilisants, bio-stimulants ? Un peu des trois mais gare aux généralisations. *Phytoma* 652, 17-21
- Alabouvette C., Cordier C., 2013. Pseudomonas fluorescents, ceux qui font résister les sols. Bio-protectants, bio-fertilisants, bio-stimulants ? Un peu des trois, et souvent à la fois... Comment, ce sous-titre vous en rappelle un autre, lu l'an dernier ? *Phytoma* 662 14-17
- Alabouvette C., Cordier C., 2015. Les Bacillus spp., des bactéries aux multiples usages. *Phytoma* 682, 22-27
- Adesemoye A.O., Torbert H.A., Kloepper J.W., 2010. Increased plant uptake of nitrogen from 15N-depleted fertilizer using plant growth-promoting rhizobacteria. *Appl Soil Ecol* 46:54–58
- Berg G., 2009. Plant–microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. *Appl Microbiol Biotechnol* 84:11–18.
- Calvo P., Nelson L., Kloepper J.W., 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil*, 383:3-41
- Chaussod R., 1996. La qualité biologique des sols: évaluation et implications. *Etude et Gestion des Sols* 3,4 : 261-277
- Compant S., Clement C., Sessitsch A., 2010. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biol Biochem* 42, 669– 678.
- Fourreau R., 2016. Fertilisation: dans la jungle des biostimulants. *Agrodistribution*, 271, 24-31
- Hayat R., Ali S., Amara U., Khalid R., Ahmed I., 2010. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Ann Microbiol* 60:579–598
- du Jardin P., 2012. The science of plant biostimulants-a bibliographic analysis. Contract 30-CE0455515/00-96, ad hoc Study on bio-stimulants products. http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/fertilizers/final_report_bio_2012_en.pdf
- Le Mire G., Nguyen M., Fassotte B., du Jardin P., VerheggenF., Delaplace P., Jijakli H., 2016. Implementing plant biostimulants and biocontrol strategies in the agroecological management of cultivated ecosystems . A review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2016 20, 299-313

Richardson A.E., Barea J.M., McNeill A.M., Prigent-Combaret C., 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms, *Plant Soil*, 321, pp. 305-339

Verma S.K. Kingsley K., Bergen M., English C., Elmore M., Khar R., White J.F., 2017. Bacterial endophytes from rice cut grass (*Leersia oryzoides* L.) increase growth, promote root gravitropic response, stimulate root hair formation, and protect rice seedlings from disease, *Plant Soil* (2018) 422:223–238

Woo S.L., Scala F., Ruocco M., Lorito M., 2006. The Molecular Biology of the Interactions Between *Trichoderma* spp., Phytopathogenic Fungi, and Plants. *Phytopathology* 96, 2, 181-185

Yadav A.N., Sachan S.G., Verma P., Saxena A.K., 2016. Bioprospecting of plant growth promoting psychrotrophic Bacilli from cold desert of north western Indian Himalayas , *Indian J Exp Biol.*, v. 52, pp. 142-150.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou DOI).