

VIE DU SOL

LES MAXI-POUVOIRS DES MICRO-ORGANISMES

Le sol abrite une grande biodiversité à l'œil nu : bactéries, champignons, etc.

Selon les types de sols et leur usage, la biomasse vivante du sol, qui est comparée à la masse de matière organique morte.

90-99 %
de matière minérale

1 à 10 %
Matière organique

85 %

de matière organique morte



15 %
d'organismes vivants

Rôle des micro-organismes

- Biodégradation des matières organiques
- Minéralisation du carbone, de l'azote
- Production de composés organiques
- Production de filaments de champignons

1 Un monde souterrain encore largement méconnu. P. 44

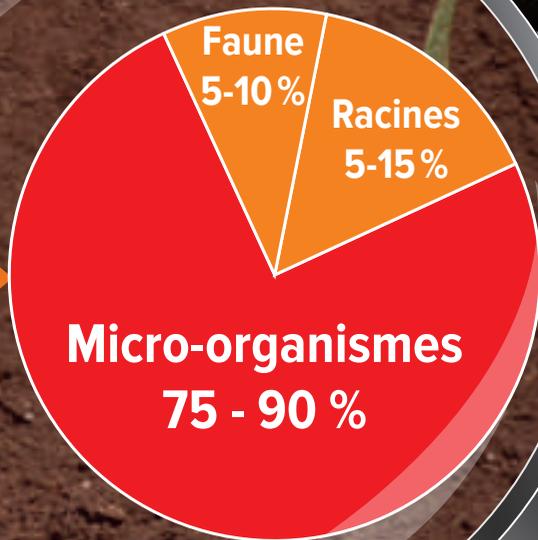
2 Observer, analyser et diagnostiquer. P. 46

3 Les biostimulants, une offre prometteuse en manque de références. P. 48

SMES

diversité de micro-organismes invisibles
archées, champignons, algues, protozoaires...

tilisation, les micro-organismes représentent entre 75 et 90%
a un poids très faible
minérale.



ismes :

aniques
zote, du phosphore et du soufre
ques liants
pignons structurant le sol

À

la fin du XIX^e siècle, un botaniste français du nom de Noël Bernard observait que la germination des graines d'orchidées ne pouvait avoir lieu qu'en présence d'un champignon spécifique. Il venait de découvrir les mycorhizes et, de façon plus générale, les liens étroits et symbiotiques qui unissent les plantes et les champignons.

Depuis, on s'est penché sur ces micro-organismes du sol invisibles à l'œil nu mais qui jouent un rôle indispensable dans la fertilité des terres : archées, bactéries, champignons ou encore protozoaires. Leur quantité et leur diversité sont énormes : dans un gramme de sol, on estime à un milliard le nombre de micro-organismes répartis en plusieurs dizaines de milliers d'espèces.

Cette vie tellurique est encore mal connue : seul 1 % des espèces sont référencées. On connaît pour autant leurs fonctions, et en particulier celle de rendre disponible pour les plantes les éléments minéraux issus de la matière organique.

FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DES SOLS

Concentré sur les premiers centimètres du sol, ce réservoir énorme de biodiversité varie en fonction des types de sols et de leurs usages. De quelles façons le travail du sol impacte-t-il les micro-organismes ? Et les produits phytos ? Les réponses sont moins tranchées qu'il n'y paraît... Depuis cinquante ans, la teneur en matière organique a tendance à diminuer dans les systèmes de grandes cultures, entraînant une baisse de la biodisponibilité des éléments du sol vers la plante. Dans ce contexte, le maintien du bon fonctionnement biologique des sols est un défi à relever pour conserver la pérennité des systèmes de production.

Pour avancer vers cet objectif, le premier pas est l'observation. Analyser, diagnostiquer, pour ensuite trouver des solutions. Dans la palette d'outils agronomiques revalorisant le potentiel du sol, les biostimulants ciblent directement l'activité biologique, en agissant sur les micro-organismes et/ou sur le système racinaire des plantes. Encore peu présents en grandes cultures, ces produits, dont l'efficacité reste difficile à mesurer, contribueront-ils au maintien de la fertilité des sols ? Sur ce sujet, la recherche se mobilise pour décrypter les multiples fonctions des micro-organismes au sein de cette véritable usine chimique qu'est le sol.

Adèle Magnard

1. Un monde **souterrain** encore largement méconnu

Les micro-organismes jouent un rôle essentiel dans la formation des sols. Des études récentes mettent en évidence leur abondance et leur diversité.

Invisibles à l'œil nu, les micro-organismes représentent 75 à 90 % de la biomasse vivante du sol. Ils sont à l'origine de nombreuses transformations chimiques permettant le recyclage des éléments, en particulier le carbone, l'azote, le phosphore ou le soufre, en biodégradant les matières organiques préalablement fragmentées par la macrofaune (vers, araignées, insectes, acariens, etc.). On estime que 15 à 35 tonnes de matière organique sont ainsi recyclées par hectare et par an. Afin de permettre aux plantes d'absorber ces éléments minéraux, ils sont en interaction directe avec les racines, dans une zone riche en échan-

ges appelée rhizosphère. Plantes et micro-organismes fonctionnent selon un contrat donnant-donnant : la plante fournit de l'énergie sous forme d'exsudats constitués de sucres et de protéines aux habitants du sol qui, en échange, lui procurent les nutriments nécessaires à sa croissance.

IMPACT SUR LA FERTILITÉ

Parmi ces micro-organismes, certains ont poussé encore plus loin la coopération en colonisant l'intérieur de la plante : les rhizobiums, bactéries fixatrices d'azote chez les légumineuses, et les mycorhizes, champignons dont les filaments colonisent les racines,

leur permettant d'explorer un très grand volume de sol.

Des expérimentations en laboratoire et au champ ont mis en évidence l'importance de la biodiversité microbienne sur la fertilité des sols. « En réduisant la biodiversité des micro-organismes de 30 %, nous avons observé une baisse de la minéralisation de la matière organique de l'ordre de 40 % », développe Lionel Ranjard, agroécologue du sol à l'Inra de Dijon. Afin d'acquérir des références sur la diversité microbiologique des sols agricoles, Lionel Ranjard et son équipe ont mis en place en 2011 un système de sciences participatives avec 250 agriculteurs dans toute la

LES PRATIQUES CULTURALES IMPACTENT L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE

Étant donné que l'activité biologique se concentre à 80 % dans les premiers centimètres du sol, elle est directement impactée par les pratiques culturales : le travail du sol, la fertilisation, l'apport de produits phytosanitaires ou encore la couverture des sols.

► **L'apport de matière organique**, par des couverts végétaux ou *via* des amendements organiques, favorise l'abondance des micro-organismes et leur activité. « Pour stimuler la biologie du sol, rien n'est plus efficace que de lui apporter à manger ! », résume Thibaut Déplanche, ingénieur au laboratoire d'analyses Celesta-lab. Il en va de même avec la diversification des rotations. « Quand il y a de la diversité au-dessus, il y a de la diversité en dessous ! », abonde Lionel Ranjard, chercheur à l'Inra de Dijon.

► Le constat est moins tranché concernant l'impact du **travail du**

sol sur les micro-organismes. « De par la multitude des techniques, il est difficile de donner un avis général sur la question », estime Lionel Ranjard. Plusieurs études apportent néanmoins des éléments de réponse. Ainsi, le travail du sol affecte les champignons en détruisant leur mycélium, mais a tendance à stimuler la diversité des bactéries, réactives aux perturbations de leur environnement. Le risque est cependant de voir apparaître des bactéries opportunistes et pathogènes. Le type d'outil utilisé a aussi une influence : les outils animés comme la herse rotative auraient un effet encore plus délétère pour les populations fongiques que le labour. Enfin, il apparaît que le travail du sol affecte plus particulièrement certains groupes microbiens comme les populations nitrifiantes ou les champignons mycorhiziens : ces derniers sont plus abondants dans

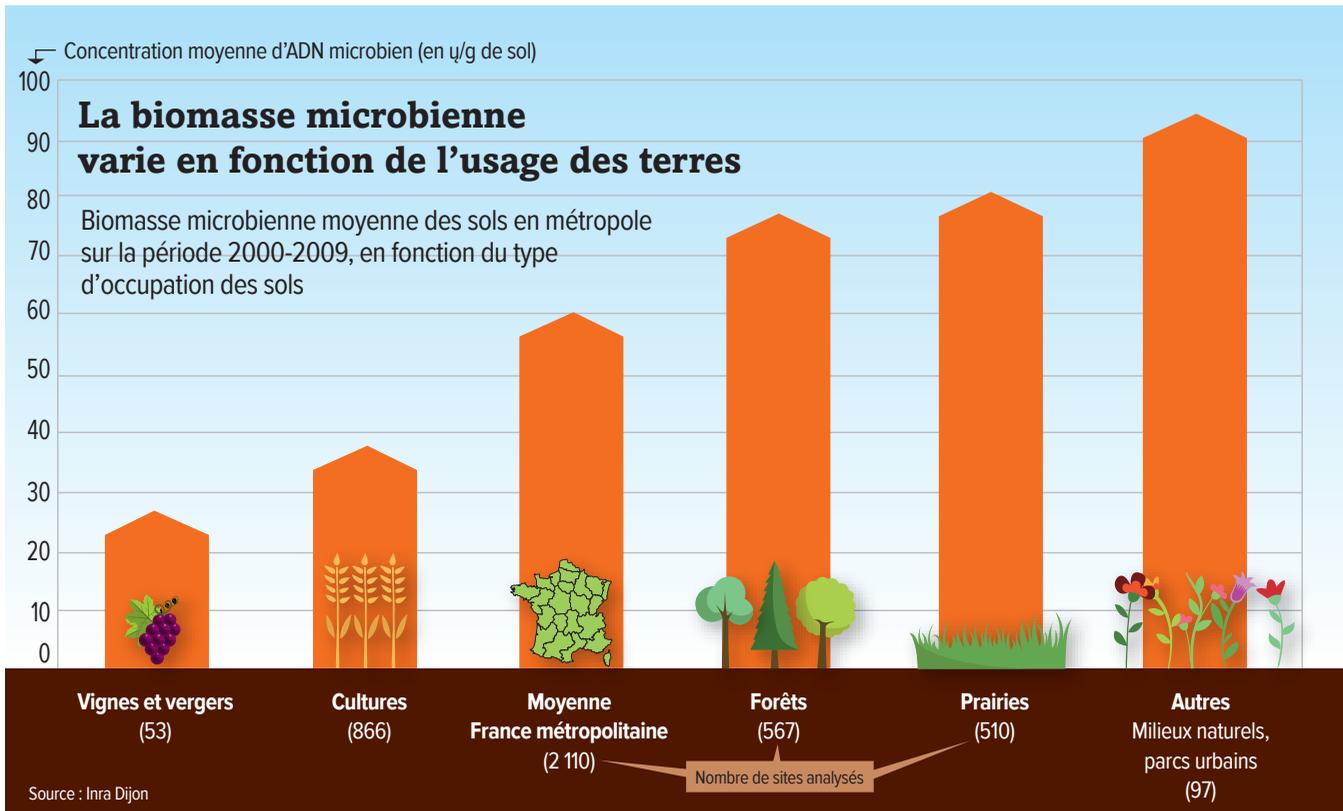


Travail du sol. Les bactéries apprécient les perturbations du milieu, qui favorisent leur diversité. À l'inverse, le travail du sol détruit le mycélium des champignons.

STÉPHANE LEITENBERGER

les systèmes moins perturbés. ► Concernant **l'impact des phytos**, on peine à acquérir des références au champ. Et pour cause : l'arrêt ou la diminution des phytos va de pair avec un changement de pratique agricole. « Il est difficile de découpler l'effet de ces pro-

duits des autres effets dus à la modification de l'itinéraire technique », explique Lionel Ranjard. Ainsi, certains sols en agriculture biologique, où le travail du sol est important, présentent moins de biodiversité que des sols en conventionnel.



France, dont une moitié en grandes cultures et une autre moitié en viticulture. « Le projet AgrInnov a amené des chercheurs et des agriculteurs à collaborer, et cela s'est avéré très positif », s'enthousiasme Lionel Ranjard.

DES SOLS AGRICOLES DE QUALITÉ

Chaque parcelle a été échantillonnée et analysée en laboratoire, pour caractériser la biomasse et la diversité microbienne, ainsi que celle des vers de terre et des nématodes. Les résultats de ce projet sur la période 2011-2015 ont montré que seulement 10 % des parcelles étudiées étaient dépréciées en termes de patrimoine et de fertilité biologique, les sols viticoles étant plus altérés que les sols de grandes cultures. « C'est un résultat encourageant pour la qualité des sols agricoles, affirme Lionel Ranjard, mais qui doit être consolidé en étendant les analyses sur un plus grand nombre de sols et de systèmes de production. » Cette extension est en bonne voie : en

2018, la participation de 200 à 300 agriculteurs supplémentaires est prévue. Autre résultat encourageant : 59 % des agriculteurs ayant participé à AgrInnov ont commencé à changer leurs pratiques sur la base du diagnostic biologique effectué (amélioration de la couverture des sols, réduction des phytos, par exemple), rassurés par la capacité de leurs sols à assurer un bon fonctionnement biologique.

RÉFÉRENTIEL NATIONAL

Contrairement à certaines idées reçues, les sols agricoles ne sont pas « morts ». Les chercheurs de l'UMR Agroécologie de l'Inra de Dijon sont allés plus loin pour le démontrer. « Grâce au réseau de la mesure de la qualité des sols (RMQS), l'abondance et la diversité microbienne ont été analysées sur 2 200 points d'échantillonnage balayant toute la France », détaille Sébastien Terrat, l'un des chercheurs de l'équipe. Grâce aux nouveaux outils de biologie moléculaire, non seulement la biomasse

microbienne mais aussi la diversité des bactéries ont été évaluées (voir l'infographie ci-dessus). Résultats : la biomasse microbienne, exprimée en microgrammes d'ADN par gramme de sol, varie en fonction de l'usage des terres.

Ainsi, les prairies arrivent en tête, devant les forêts, cultures, vignes et vergers. En revanche, la diversité de ces bactéries, exprimée en nombres de taxons (groupes d'individus partageant des caractéristiques génétiques proches), dépend plus du type de sol que de son mode d'utilisation. Les sols les moins riches en diversité bactérienne se trouvent dans le Sud-Ouest (Landes), le Centre et le Nord-Est, alors que les sols les plus riches sont situés en Bretagne, dans le Nord et sur le pourtour méditerranéen.

Un projet est en attente de financement pour effectuer ce même type d'étude avec les champignons du sol. Elle permettra d'élaborer, pour la première fois, des référentiels sur l'abondance et la diversité des sols à l'échelle nationale.

2. Observer, analyser et **diagnostiquer**

Comment évaluer la quantité et la diversité des micro-organismes présents dans son sol ? Si rien ne vaut une analyse effectuée en laboratoire, quelques tests simples permettent de s'en faire une idée.

1 STRUCTURE DU SOL

L'observation de ses sols est riche en enseignements : non tassé et non battant, il laisse passer l'eau et l'air et crée des conditions propices au développement des micro-organismes.

2 PROPRIÉTÉS ACIDO-BASIQUES

La forte présence de mousses dans les parcelles peut indiquer une acidification de la surface. Or, plus le sol est acide, moins les échanges d'éléments minéraux entre les racines et les micro-organismes seront possibles. Un sol ayant un pH inférieur à 5,5 nécessitera un chaulage afin de débloquent la disponibilité des minéraux, notamment du phosphore, dont la fourchette d'assimilation est très limitée.



3 MATIÈRE ORGANIQUE

La vitesse de dégradation des résidus sur le sol est un bon moyen d'évaluer son niveau d'activité biologique. Dans un sol qui fonctionne correctement et avec des conditions climatiques normales, les pailles de céréales mettent 3 à 6 mois à disparaître et les cannes de maïs jusqu'à 6 mois. Le test du « litterbag », qui consiste à enterrer à quelques centimètres de profondeur un sachet en nylon contenant de la paille, renseigne aussi sur l'activité de minéralisation. Après quatre mois, plus de 50 % de la matière organique devrait être dégradée.

La présence de « chapeaux » de champignons visibles à l'œil nu est un bon indicateur d'activité biologique : ce sont les organes reproducteurs des basidiomycètes et des ascomycètes.

4 SYSTÈME RACINAIRE

La réalisation d'un profil de sol est l'occasion d'observer le comportement des racines : si elles fuient en profondeur sans se ramifier, c'est qu'elles ne trouvent pas d'activité biologique suffisante dans les premiers centimètres du sol. La présence de ramifications abondantes est signe d'une bonne alimentation.

Nourriture. En apportant de la biomasse, les couverts végétaux stimulent l'activité biologique des sols. Leurs racines le structurent et l'enrichissent, stockent l'eau et les éléments minéraux.

LYDIE LECARPENTIER

RECORRIR AUX LABORATOIRES

Les laboratoires proposant des analyses microbiologiques du sol en France se comptent sur les doigts de la main (1) mais offrent un diagnostic complet et pointu. En plus de la teneur globale en biomasse microbienne, Celestalab, laboratoire qui travaille depuis plus de vingt ans sur le sujet, me-

sure l'activité de minéralisation du carbone et de l'azote. « Les échantillons sont incubés à 28 °C pendant 28 jours, ce qui simule à peu près quatre mois d'activité au champ, détaille Thibaut Déplanche, ingénieur au sein du laboratoire. Nous sommes ainsi en mesure d'évaluer en amont la

quantité d'azote potentiellement minéralisable dans la parcelle. » Un diagnostic impossible à déduire des seules observations sur le terrain. « L'idée est de comparer la quantité de micro-organismes aux convives d'un buffet, illustre Thibaut Déplanche. Il faut qu'il y ait assez de nourriture pour tout le

monde. À l'inverse, trop de nourriture et pas assez de convives entraîneront une déstabilisation du milieu. » Le diagnostic complet coûte autour de 250 euros. En 2016, le laboratoire a effectué plus de 2 000 analyses.

(1) Parmi eux, Celestalab (Vaucluse), Elisol (Gard), LAMS (Côte-d'Or), Galys (Loir-et-Cher)...

3. Les **biostimulants**, une offre prometteuse en manque de références

Les produits de stimulation du sol foisonnent mais leur efficacité reste aléatoire et les essais systémiques peu nombreux.

A SAVOIR

Homologation

> Vendus sous le statut de MFSC (matière fertilisante et support de culture), les biostimulants sont à différencier des produits de biocontrôle, qui sont homologués comme produits phytosanitaires.

Les laboratoires de recherche et développement s'intéressent depuis longtemps aux relations entre plantes et micro-organismes. L'idée : utiliser ces symbioses pour améliorer les rendements, sans augmentation des engrais. Ces dernières années, de nombreux produits revendiquant une stimulation de l'activité biologique des sols fleurissent (lire l'encadré p. 49). Ils s'appellent « biofertilisants », « activateurs de sol », « stimulateurs de croissance », etc., et sont vendus la plupart du temps sous le statut de fertilisants. Un rapport du ministère de l'Agriculture datant de 2015 estime le nombre de produits biostimulants sur le marché français à plus de 300. Ils contiennent diverses substances (bactéries, levures, champignons,

extraits d'algues, éléments minéraux, protéines...) et ont pour but de stimuler les processus naturels afin d'améliorer l'absorption des nutriments par les plantes. Si certains biostimulants ont trouvé un marché en maraîchage et en horticulture, notamment dans les cultures sous serre, ils peinent à gagner le marché des grandes cultures. Et leur prix, parfois prohibitif, n'est pas le seul frein.

UN CONCENTRÉ DES MEILLEURES SOUCHES

Premier problème : les essais démontrant l'efficacité de ces produits sont encore peu nombreux. Et les résultats mesurés restent aléatoires. Ils dépendent des conditions de l'année, du potentiel et du type de sol, des prati-



ques culturales en matière de fertilisation et de travail du sol, ou encore de la diversité des cultures produites. Second problème : dans un sol en bon état biologique, « un micro-organisme exogène ne reste pas plus que quelques jours avant d'être détruit », avise Lionel Ranjard, chercheur à l'Inra de Dijon. L'entreprise toulousaine Agronutrition, filiale du groupe De Sangosse, a peut-être trouvé une alternative. A partir d'un échantillon de sol prélevé par un agriculteur, le laboratoire de l'entreprise sélectionne et multiplie les meilleures souches de bactéries fixatrices d'azote. Une solution concentrée est ensuite renvoyée à l'agriculteur, qui la pulvérise sur les résidus pailleux de la parcelle d'où provient l'échantillon. Des essais dans le Sud-Ouest de la France ont montré que cette pratique permettait d'économiser 20 unités d'azote après un blé.

EFFET STARTER

Outre l'assimilation de l'azote, c'est sur la biodisponibilité du phosphore

EXPLOITER LES CHAMPIGNONS DU SOL

Dans les années à venir, la possibilité pour les plantes d'exploiter la capacité des champignons à capter des éléments minéraux pourrait être généralisée aux grandes cultures. « La technique est déjà utilisée au Canada sur 200 000 ha de soja, blé, lentille, oignons ou pommes de terre, explique Guillaume Bécard, chercheur au Laboratoire de recherches en sciences végétales du CNRS et de l'université Paul Sabatier de Toulouse. Des champignons microscopiques qui vivent en symbiose avec les racines des plantes captent des molécules de phosphore, d'azote ou de zinc que les racines ne peuvent pas capter, grâce à la formation dans le sol d'une quantité importante de mycélium appelé arbuscules. Notre objectif est d'utiliser ces champignons pour mycorhizer les plantes cultivées et réduire ainsi les quantités d'engrais de synthèse. Plusieurs entreprises commercialisent ce type d'inoculum : au Canada, Premier Tech, en Inde,



Symbiose. Une quantité importante d'arbuscules (photo) formés dans le sol captent les molécules de phosphore, d'azote ou de zinc. B. CAILLIEZ

Tera Biotechnology et, en France, Agronutrition, filiale de De Sangosse, avec qui le laboratoire de Toulouse collabore. »

Blandine Cailliez



que la recherche s'est engagée. La société Lallemand Plant Care, qui travaille sur les biostimulants depuis vingt ans, commercialise la souche *Bacillus IT45*, associée à des mycorhizes, sur maïs, céréales et légumes d'industrie. Cette bactérie stimule la croissance des racines et contribue à augmenter la solubilisation du phosphore. « Apporté sous forme de microgranulés sur maïs, ces pro-

duits peuvent se substituer au 18-46 pour un effet starter », précise Olivier Cor, responsable agronomique chez Lallemand.

Un essai réalisé en 2015 dans le Pas-de-Calais par le service belge du Carah (1) montre une augmentation significative de rendement lors d'un apport de ce produit au semis, en plus d'une fertilisation de 100 unités d'azote/ha : +1,34 tonne de matière

Activateurs. Certains produits visent à « booster » l'activité biologique des sols à travers l'utilisation de micro-organismes capables de stimuler le développement racinaire et d'améliorer l'assimilation des minéraux.

JEAN MICHEL NOSSANT

sèche par hectare en maïs ensilage. Une diminution des reliquats azotés en sortie de récolte est également observée (-37%). L'impact de la souche bactérienne *Bacillus IT45* sur le captage des éléments fertilisants est ici mis en évidence. En réduisant la fertilisation azotée, en revanche, l'effet sur le rendement est moindre.

ADOPTER UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE

Arvalis a mis en place un réseau d'essais en vue d'évaluer certains produits revendiquant une stimulation de l'activité biologique des sols. Il montre que, pour le moment, « aucun produit testé ne génère de gain de rendement moyen significatif ». Lorsque ces produits étaient utilisés en situation de réduction de la fertilisation, la perte de rendement n'était « pas compensée par l'utilisation d'un activateur, quel que soit le produit évalué ».

Qu'elles viennent des instituts, centres de recherche, établissements privés ou groupes d'agriculteurs, il est certain que des expérimentations de longue durée sont à mettre en place. Cependant, les biostimulants ne doivent pas être considérés comme de simples produits de substitution dans un système conventionnel. Ils sont à intégrer dans des démarches d'innovation et de reconception des systèmes agricoles, dans lesquels l'agronomie occupe une place majeure.

(1) Centre pour l'agronomie et l'agro-industrie de la province de Hainaut.

DES RECHERCHES TOUS AZIMUTS

► De nombreuses entreprises d'agrofourmure s'intéressent aux micro-organismes du sol et aux biostimulants, comme par exemple (1) **Arysta LifeScience-Goëmar, Nufarm, Sumi Agro, Sobac, Agronutrition, Lallemand, Italpollina, PRP Technologies, Koppert**. En novembre dernier, **Gaïago** a obtenu l'homologation de l'activateur de sol Free N100, à base de la bactérie *azotobacter*, « le premier et unique produit fixateur d'azote dans l'air ». De son côté, **Compo Expert** lance, en 2017, un produit contenant l'inoculum E4 CDX2, à base de *Bacillus amyloliquefaciens*, « la première préparation microbienne utilisable comme additif agro-

nomique pour matières fertilisantes », selon la firme. Le produit stimule la croissance racinaire et améliore la biodisponibilité des éléments dans le sol, notamment le phosphore minéral. Il est associé aux engrais conventionnels.

► Les grands groupes se penchent aussi sur les micro-organismes, à l'instar de l'américain **Monsanto** qui s'est allié, en décembre 2013, au danois **Novozymes** en créant la plate-forme de collaboration The BioAg Alliance, dédiée à la recherche, au développement et à la mise sur le marché de produits à base de micro-organismes. Objectif : couvrir 100 à 200 millions d'hectares au niveau mondial d'ici à 2025. Pour cela

The BioAg Alliance met les grands moyens. Elle a ainsi conduit en 2015 et 2016 un vaste programme d'expérimentations au champ afin de tester des souches de bactéries et de champignons isolés à partir de différents sols agricoles américains. La plate-forme a annoncé, début janvier, vouloir mettre sur le marché américain, en 2017, deux inoculants, l'un destiné au maïs, l'autre au soja. Les gains espérés sont de l'ordre de 1 à 3 q/ha. D'autres produits sont attendus en 2019. Des recherches sont également lancées sur le blé.

Isabelle Escoffier

(1) Liste non exhaustive.