

# Champignons mycorhiziens arbusculaires, bioindicateurs dans les sols agricoles suisses

Fritz Oehl<sup>1</sup>, Jan Jansa<sup>2</sup>, Kurt Ineichen<sup>3</sup>, Paul Mäder<sup>4</sup> et Marcel van der Heijden<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zurich

<sup>2</sup>Ecole polytechnique fédérale EPF Zurich, Institut d'agronomie, 8315 Lindau

<sup>3</sup>Zurich-Bâle Plant Science Center PSC, Institut botanique de l'Université de Bâle, 4056 Bâle

<sup>4</sup>Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, 5070 Frick

Renseignements: Fritz Oehl, e-mail: fritz.oehl@art.admin.ch, tél. +41 44 377 73 21



**Figure 1** | La symbiose des mycorhizes arbusculaires entraîne souvent une meilleure absorption des éléments nutritifs, une meilleure croissance et une floraison plus précoce des plantes.

A gauche: trèfle violet sans champignons MA dans les racines et leurs environs.

A droite: sol inoculé avec des champignons MA en même temps que le semis. (Photo: ART)

## Introduction

Les effets positifs des champignons mycorhiziens arbusculaires (champignons MA) pour la croissance des végétaux ont été découverts dès le XIX<sup>e</sup> siècle. Aujourd'hui, on considère qu'ils constituent la symbiose efficace la plus répandue: plus de 80 % des plantes terrestres peuvent vivre en symbiose avec ces champignons. A ce jour, environ 230 espèces de champignons MA ont été recensées dans le monde.

La plupart des plantes de prairies et de terres cultivées sont associées à un grand nombre de champignons MA. Ces derniers font partie des glomérormycètes (*Glo-*

*meromycota*, champignons glomérulaires ou arbusculaires), d'après le nom de genre *Glomus*, le plus fréquent dans cette division et le premier découvert. Un autre groupe connu de champignons mycorhiziens sont les ectomycorhizes (cèpes, basidiomycètes, etc.), qui vivent par exemple en symbiose très spécifique avec les arbres des forêts d'Europe centrale.

Les champignons MA occupent de nombreuses fonctions dans les écosystèmes. D'une part, ils jouent un rôle central en absorbant les éléments nutritifs et en les retransmettant ensuite aux plantes, notamment le phosphore (P); (Jansa *et al.* 2005; Tchabi *et al.* 2010), mais aussi d'autres éléments nutritifs (N, K, Zn, etc.). En cas de

carence en azote, Mäder *et al.* (2000) ont estimé la quantité d'azote absorbée par les hyphes de champignons MA à près de 40 %. Lors d'une carence en phosphore, les plantes peuvent absorber près de 90 % du phosphore dont elles ont besoin grâce aux champignons MA. Les espèces de trèfles notamment, qui ont des besoins importants en phosphore, profitent beaucoup des champignons MA (fig. 1). Par ailleurs, ces champignons contribuent à réduire l'infestation des plantes par les agents pathogènes et les ravageurs, surtout au niveau des racines. Les plantes à mycorhizes sont souvent mieux approvisionnées en eau (surtout pendant et après les brèves périodes de sécheresse; Neumann et George 2004). Grâce à un réseau vivant, elles stimulent la structuration du sol, ce qui induit généralement une meilleure protection contre l'érosion, une infiltration et un stockage de l'eau meilleurs, et enfin une meilleure levée des plantes (Rillig et Mummey 2006; Schmid *et al.* 2008). Le réseau serré de filaments mycéliens dans le sol permet également d'empêcher le lessivage des éléments nutritifs (van der Heijden 2010). La diversité de ces champignons peut apporter une contribution capitale à la biodiversité et à la productivité des associations végétales des prairies (van der Heijden *et al.* 1998).

Les principales fonctions écologiques et agronomiques de nombreux champignons MA dans les sols ont été peu étudiées jusqu'ici. On suppose que leurs performances diffèrent beaucoup en fonction de leur partenaire de symbiose, de l'écosystème et du site concernés. Cet article résume les études effectuées au cours des douze dernières années sur la biodiversité des champignons MA et vérifie si ces champignons pourraient éventuellement servir de bioindicateurs dans les écosystèmes agricoles. Les bioindicateurs, également appelés *espèces indicatrices*, sont des organismes vivants qui réagissent aux influences de l'homme en modifiant leurs fonctions vitales ou leur présence/absence (p. ex. plantes indicatrices, ou certaines espèces de lichen, utilisées comme indicateurs de la contamination de l'air). Les champignons MA semblent particulièrement bien convenir comme indicateurs biologiques des sols et de l'exploitation des terres, car ce groupe de champignons, relativement restreint, comprend à la fois des espèces rares et répandues, et occupe des fonctions essentielles dans tous les écosystèmes colonisés par les végétaux.

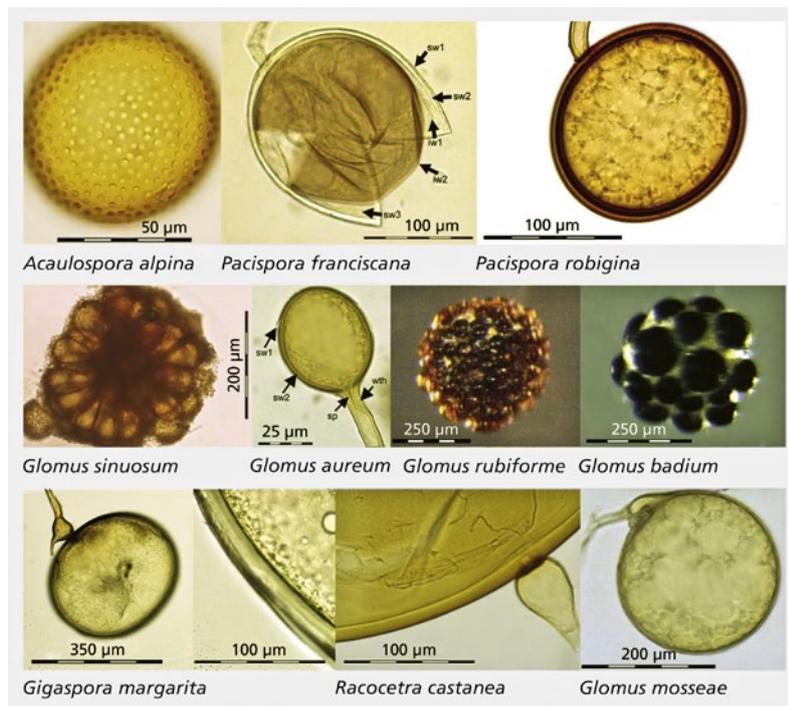
## Matériel et méthodes

De 1999 à 2011, une série d'études a été effectuée en Suisse pour évaluer la biodiversité des champignons MA dans les sols agricoles des Alpes, du Plateau et du Jura.

## Résumé

La plupart des plantes cultivées et sauvages vivent en symbiose avec un groupe bien spécifique de champignons, les champignons mycorhiziens arbusculaires (champignons MA). Ces derniers occupent des fonctions importantes dans tous les écosystèmes colonisés par les végétaux. Ils forment un réseau très développé de filaments mycéliens dans le sol et transmettent aux plantes les éléments nutritifs essentiels. Ils protègent ainsi les végétaux du stress et de la sécheresse et réduisent les pertes d'éléments nutritifs du sol. Ils peuvent limiter l'érosion grâce à leur structure vivante et ainsi augmenter la stabilité des écosystèmes. Les champignons MA semblent particulièrement bien convenir comme bioindicateurs, car ce groupe de champignons, avec 230 espèces connues, reste relativement petit et comprend à la fois des espèces courantes et des espèces rares. En Suisse, plus de 100 champignons MA ont été recensés à ce jour, dont plusieurs espèces particulières qui réagissent fortement à l'intensité et au mode d'exploitation des terres et/ou aux caractéristiques du sol (par exemple *Glomus sinuosum* et *Acaulospora paulinae*). Ces espèces conviennent dès lors très bien comme bioindicateurs. D'autres espèces existent dans presque tous les types de sol et peuvent être qualifiées de généralistes (par exemple *Gl. fasciculatum* et *Archaeospora trappei*).

La première étude a analysé les répercussions de l'intensité du travail du sol dans les terres assolées sur les communautés de champignons dans un sol par brun sur moraine, sur le site de la station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART en Thurgovie (Jansa *et al.* 2002, 2003). Une deuxième étude a été consacrée aux répercussions des cultures biologiques et conventionnelles sur les communautés de champignons MA dans un sol par brun sur loess, dans l'essai DOC à Therwil, Bâle-Campagne (Oehl *et al.* 2004). Parallèlement, des prairies extensives et des parcelles de maïs intensives sans assolement situées dans les environs de l'essai DOC ont été intégrées à l'étude, afin de couvrir l'échelle la plus vaste possible dans l'intensité d'exploitation d'un même type de sol (Oehl *et al.* 2003, 2009). La répartition verticale des champignons MA dans ce type de terrain (Oehl *et al.* 2005b) a également fait l'objet d'une étude, qui a été étendue à plusieurs types de sol et plusieurs niveaux de



**Figure 2** | Spores de certains champignons MA sélectionnés: *Ac. alpina* est très répandu dans les prés de l'étage subalpin et alpin avec un pH < 7,0. *Pa. robigina* est un représentant typique des éboulis calcaires de l'étage nival, tandis que *Pa. franciscana* avec un pH > 6,5 peut éventuellement être trouvé à des altitudes plus basses jusque dans les zones subalpines. *Gl. sinuosum* se trouve dans les sols avec un pH > 6,5 des zones de plaine jusque dans l'étage montagnard, tandis que *Gl. rubiforme* est présent jusque dans les régions de haute montagne. Ces deux espèces sont également connues dans les climats chauds. En Europe, la diffusion de *Gl. badium* est similaire à celle de *Gl. sinuosum*. Celui-ci est également très fréquent dans les champs où le travail du sol est minimal et semble se limiter aux zones climatiques plus fraîches. *Gl. aureum* est un des champignons les plus répandus dans les prairies permanentes européennes en dessous de la limite de la forêt. Ce champignon ne disparaît des parcelles que lorsque le mode d'exploitation est unilatéral et le travail du sol fréquent. Par contre, *Gl. mosseae* est un représentant typique des terres cultivées avec un pH > 6,0, mais il fait partie des généralistes, puisqu'on le trouve éga-

lement dans les prairies et qu'il est présent dans le monde entier. Toutefois, il semble être totalement absent de la zone alpine. *Gl. margarita* est un représentant des climats chauds. Mais cette espèce existe aussi chez nous, de préférence dans les sols acides, dans les prairies à fromental et systèmes de grandes cultures durables avec couverture presque permanente du sol. *Ra. castanea* réagit de manière sensible à un travail du sol intensif. (Photos ART)

profondeur (Oehl et al. 2010a), afin de mieux estimer l'influence du sol sur les communautés de champignons MA. Les résultats des différentes études seront présentés et discutés plus loin.

Les études s'appuient généralement sur les définitions morphologiques des populations de spores (Oehl et al. 2003 et 2010a), mais aussi sur des analyses de biologie moléculaire pratiquées directement sur l'ADN des champignons MA extrait des racines de plantes (Jansa et al. 2003). Des champignons encore inconnus ont été caractérisés le plus précisément possible à l'aide d'analyses combinées (Jansa et al. 2002; Oehl et al. 2005a, 2006, 2010 et 2011).

## Résultats et discussion

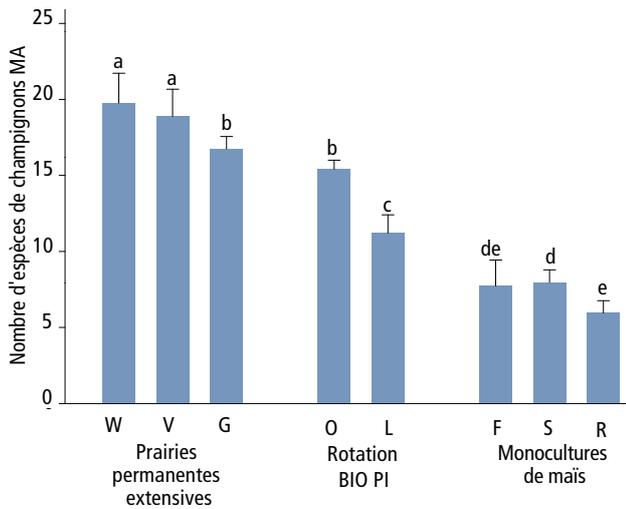
### Diffusion des champignons MA en Suisse

Au total, plus de 100 des quelque 230 champignons MA répertoriés dans le monde ont été identifiés dans les sols agricoles suisses. Plusieurs de ces espèces sont encore considérées comme inconnues, tandis que plus de dix nouvelles espèces ont été décrites ces dix dernières années (Oehl et Sieverding 2004; Gamper et al. 2009; Oehl et al. 2005a, 2006, 2010b et 2011). Les données relatives à la diffusion géographique de plusieurs

des espèces ont été collectées en Suisse. Les spores de certaines espèces de champignons MA sélectionnées sont présentées à la figure 2.

### L'exploitation intensive diminue la diversité des CMA

Plusieurs études ont montré que l'intensité d'exploitation et le système cultural influencent beaucoup la diversité et les communautés des champignons MA (fig. 3; Oehl et al. 2003). Une grande biodiversité a été observée dans les prairies et les pâturages, tandis que les terres assolées intensives contiennent souvent nettement moins d'espèces. Sur le site de Tänikon, les systèmes avec travail minimal du sol et surtout les systèmes sans labour présentent une autre population de champignons MA que les systèmes avec labour annuel (Jansa et al. 2002 et 2003). Les espèces *Gigaspora*, *Scutellospora*, *Racocetra* et *Cetraspora* notamment semblent souffrir d'un travail du sol fréquent, car elles ne parviennent que difficilement à raccorder les filaments mycéliens rompus (de la Providenzia et al. 2005). Sur une rendzine calcaire dans le canton de Bâle-Campagne soumise à un travail du sol réduit, on a en revanche trouvé un nombre d'espèces et un potentiel de mycorhization aussi élevés que dans les prairies à fromental et à brome voisines (Oehl et al. 2010a).



**Figure 3 |** Richesse des espèces de champignons MA sur neuf sites de la région de Bâle. Le nombre des espèces de champignons MA décroît dans l'ordre suivant: prairies permanentes extensives (W, V, G), Bio-Suisse (Bioland; procédé organique biologique de l'essai DOC Therwil, BL; rotation sur 7 ans; O), IP-Suisse (rotation sur 7 ans; L) et monocultures de maïs (sites F, S, R; Oehl et al. 2003). Les moyennes et les écarts-types de quatre répétitions par site ainsi que les différences statistiques entre les procédés sont indiqués par différentes lettres au-dessus des colonnes selon l'analyse de variance et le test Fisher's-LSD ( $P < 0,05$ ).

### L'agriculture biologique stimule la diversité des CMA

Avec une rotation de sept ans dans les deux cas, l'essai DOC de longue durée dans les conditions de l'agriculture biologique à Therwil a permis de recenser une diversité d'espèces légèrement plus importante que dans la culture conventionnelle selon les directives PI (Oehl et al. 2004). Les différences dans les communautés de champignons MA s'expliquent par la fumure plus réduite avec le procédé biologique, mais peuvent également être liées à la proportion et à la diversité plus importantes des adventices dans les parcelles bio (tabl. 1). A ce niveau, les espèces non *Glomus* ont réagi de manière plus sensible au mode d'exploitation que les espèces *Glomus* (tabl. 1; fig. 4). Il est intéressant de constater que le taux de diversité des champignons MA n'était que légèrement inférieur dans tous les procédés biologiques et PI par rapport à celui des prairies permanentes voisines (Oehl et al. 2003 et 2004). Dans l'étude suisse comme dans une étude hollandaise (Verbruggen et al. 2010), les communautés de champignons MA des prairies et des cultures biologiques étaient nettement plus semblables que celles des prairies et des cultures conventionnelles (Oehl et al. 2003, Verbruggen et al. 2010, fig. 5). Nous considérons qu'une

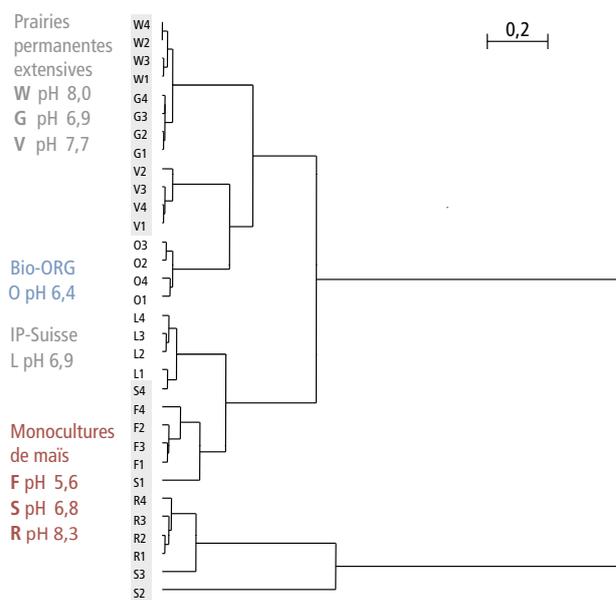
**Tableau 1 |** Régressions linéaires entre des paramètres de sol sélectionnés et les densités de spores des espèces de champignons MA trouvées dans l'essai DOC (Therwil, BL; Oehl et al. 2004). \*Indique les relations significatives entre un paramètre de sol et la densité de spores de tel champignon; les données sont basées sur les résultats de cinq procédés culturaux, avec quatre répétitions par procédé.

Espèces de champignons MA	pH (H <sub>2</sub> O)	Teneur en humus	Teneur en P disponible	Teneur en K disponible	Nombre d'espèces d'adventices
<b>Espèces <i>Glomus</i></b>					
<i>Glomus diaphanum</i>	-0,26	-0,48*	0,51*	0,42	0,26
<i>G. caledonium</i>	-0,36	-0,21	0,56*	0,63*	-0,36
<i>G. etunicatum</i>	0,19	0,09	-0,33	-0,36	0,34
<i>G. fasciculatum</i>	0,06	0,09	-0,16	-0,14	0,19
<i>G. mosseae</i>	0,28	0,08	-0,05	-0,1	0,06
<i>Glomus sp. isolate BR9</i>	0,1	0,26	-0,14	-0,09	0,2
<i>G. geosporum</i>	0	0,08	-0,09	0,16	-0,4
<i>G. albidum</i> & <i>P. occultum</i>	0,29	-0,19	-0,27	0,46	-0,25
<i>G. constrictum</i>	0,37	0,31	0,08	0,03	-0,03
<i>G. invermaium</i>	0,19	-0,03	-0,2	-0,3	-0,37
<b>Espèces non <i>Glomus</i></b>					
<i>Pacispora dominikii</i>	0,62*	0,21	-0,51*	-0,2	0,61*
<i>Scutellospora calospora</i>	0,1	0,24	-0,48*	-0,55*	0,32
<i>Cetraspora pellucida</i>	-0,27	-0,28	-0,48*	-0,58*	0,48*
<i>Acaulospora paulinae</i>	0,09	-0,14	-0,62*	-0,67*	0,4
<i>A. thomii</i>	0,13	-0,24	-0,49*	-0,55*	0,43
<i>A. laevis</i>	0,04	-0,15	-0,53*	-0,57*	0,38
<i>A. longula</i>	0,23	0,26	-0,70*	-0,58*	0,56*
<i>A. scrobiculata</i>	0,21	-0,42	-0,66*	-0,57*	0,39

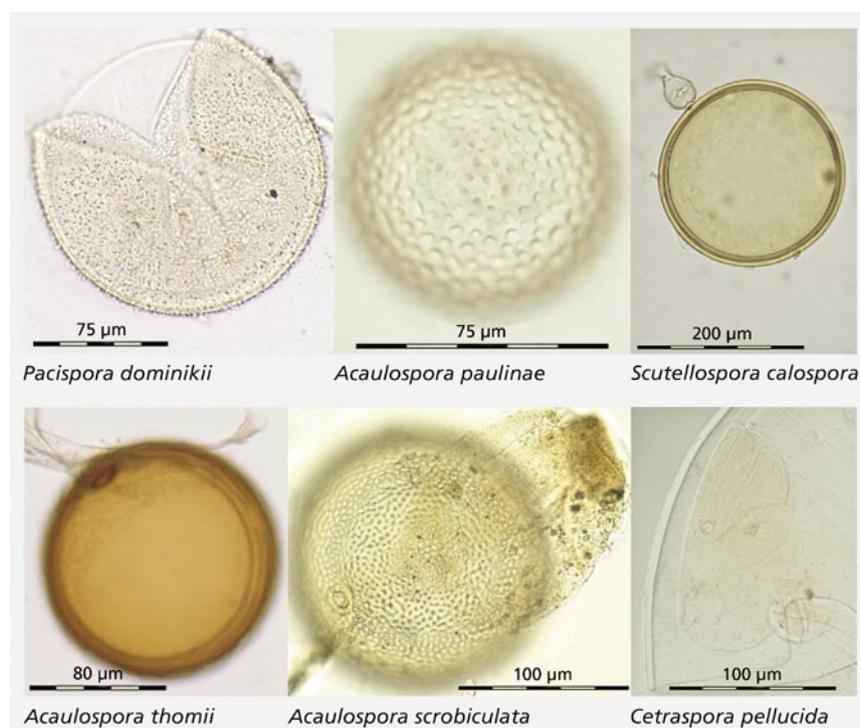
grande diversité de champignons MA, avec beaucoup de champignons MA actifs au printemps, à l'automne et toute l'année (Oehl *et al.* 2009), accroît la fonction de tampon biologique et la fertilité biologique des sols de ces systèmes culturaux. Cela correspond donc tout à fait aux objectifs premiers de l'agriculture écologique, à savoir améliorer la durabilité en stimulant la structure vivante des sols.

#### Propriétés du sol et diversité des espèces de CMA

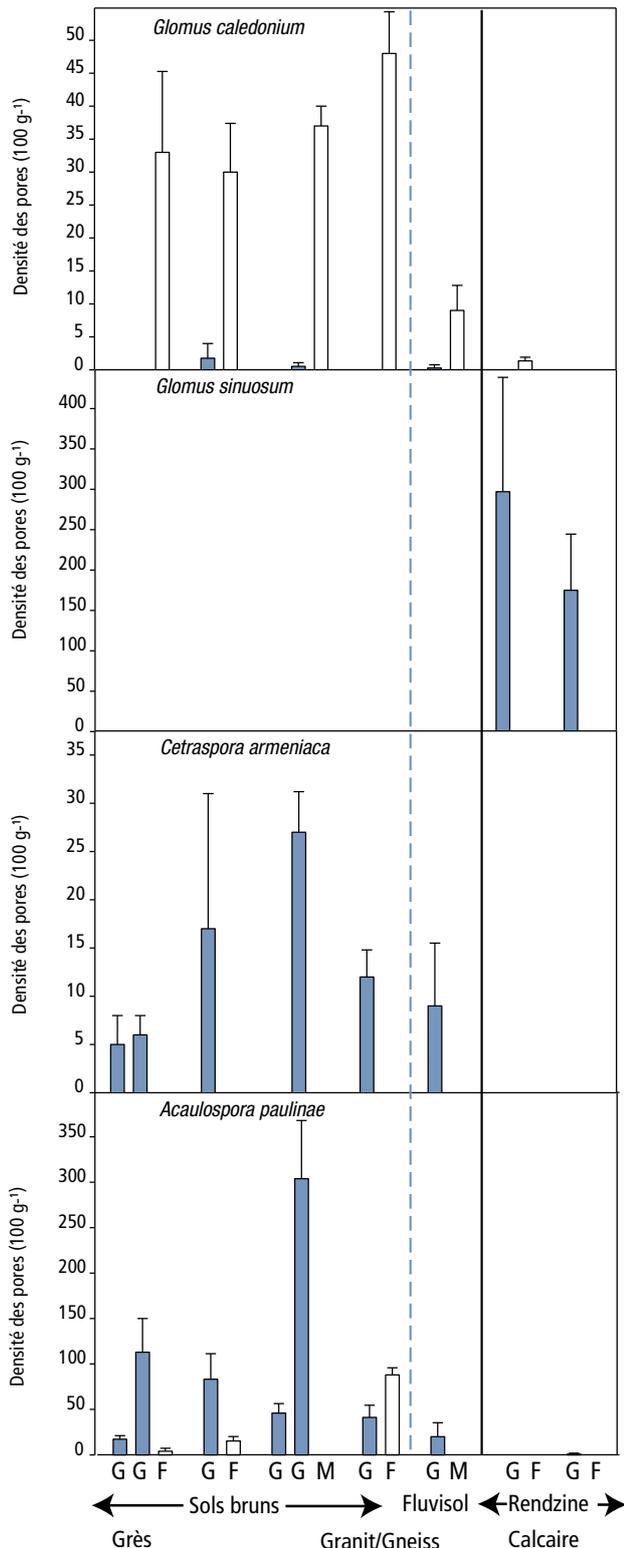
Les études effectuées dans la région de Bâle ont montré que différents sols d'un même paysage peuvent certes présenter une diversité élevée de champignons MA, mais que les communautés de champignons MA des différents sols se distinguent considérablement les unes des autres (Oehl *et al.* 2010a). Les sols sous les prairies affichent généralement une diversité de genres nettement plus importante que les sols calcaires (Oehl *et al.* 2003, 2005b et 2010a; Sýkorová *et al.* 2007a). Il était frappant de constater l'absence – ou la présence extrêmement limitée – des espèces *Acaulospora*, *Scutellospora*, *Gigaspora* et *Cetranspora* dans les sols calcaires, qui comptaient de nombreuses espèces *Glomus*, ainsi qu'une présence nette-



**Figure 5** | L'analyse hiérarchique par partitionnement des données sur les points communs des communautés de champignons MA dans les sols agricoles sur loess dans la région de Bâle montre un net regroupement en fonction de l'intensité d'exploitation. Les neuf sites sont expliqués à la figure 3. Des échantillons ont été prélevés et étudiés sur quatre parcelles (1–4) de chacun des sites (Oehl *et al.* 2003).



**Figure 4** | Exemples d'espèces de champignons MA (présentées ici avec leurs spores permanents), qui ont réagi de manière particulièrement sensible à des labours fréquents (*Scutellospora calospora*, *Cetranspora pellucida* et *Acaulospora paulinae*; Jansa *et al.* 2002) ou à des apports d'engrais élevés par rapport aux procédés organique biologique et biologique dynamique de l'essai DOC (toutes les espèces représentées; Oehl *et al.* 2004). (Photos ART)



**Figure 6** | Spécialistes: *Glomus caledonium*, *Gl. sinuosum*, *Cetranspora armeniaca* et *Acaulospora paulinae* peuvent servir d'indicateurs biologiques pour les sols et/ou le mode d'exploitation. Suivant le système d'exploitation (herbage permanent G, parcelles avec rotations longues F, et monoculture de maïs M) et le sol, ils ont été recensés en grand nombre, rarement ou pas du tout (Oehl et al. 2010a). Les densités des spores sont représentées sous forme de moyennes de quatre répétitions par site avec erreur type.

ment plus élevée de *Pacispora dominikii*. Sur les 61 champignons MA trouvés dans la région, seul environ un quart (14 espèces) ont été classés dans la catégorie «généralistes». Ils ont été recensés dans tous les sols avec des densités de spores plus ou moins similaires. La majorité des espèces (32) était plutôt des «spécialistes», qui peuvent être qualifiés d'espèces caractéristiques pour certaines intensités d'exploitation et/ou formes de sol (Oehl et al. 2010a). Neuf espèces ont été déterminées comme spécifiques au sol, et neuf comme spécifiques au mode d'exploitation. Pour 14 autres espèces une interaction a été constatée entre le sol et le mode d'exploitation. Des exemples de «spécialistes» sont présentés dans la figure 6. Tandis que *Gl. caledonium* se trouve presque exclusivement dans les parcelles acides et semble même réagir de façon plutôt positive à des apports élevés en phosphore (tabl. 1), *Gl. sinuosum* n'a été trouvé que dans des prairies avec des sols à pH élevé (fig. 6). En revanche, *Cetranspora armeniaca* est caractéristique des prairies acides. Enfin, *Acaulospora paulinae* (fig. 7) n'apparaît lui aussi que dans les sols acides. Il est partiellement stimulé par des rotations longues et une fumure réduite, mais est totalement absent des sols comparables où sont pratiquées des monocultures intensives de maïs sans couverture du sol pendant toute l'année.

#### Influence de l'altitude sur les communautés de CMA

Une étude réalisée dans cinq régions des Alpes suisses a montré que les communautés de champignons MA varient également avec l'altitude. Tandis que les espèces *Pacispora* se trouvent surtout sur les éboulis calcaires de l'étage nival et alpin (Oehl et Sieverding 2004), les espèces *Ambispora* ont essentiellement été recensées dans les pelouses de haute montagne (Spain et al. 2006). La présence des espèces *Acaulospora* et *Diversispora* augmente elle aussi avec l'altitude (Oehl et al. 2006, Sýkorová et al. 2007b). Au contraire, des espèces de *Scutellospora*, *Cetranspora*, *Racocetra* et *Gigaspora* n'ont que rarement, voire jamais, été recensées au-delà de la limite de la forêt.

#### Les CMA: de bons indicateurs biologiques et pédologiques

Nos études nous ont permis de conclure que les sols agricoles pouvaient être caractérisés par leurs communautés de champignons MA. La présence ou l'absence d'espèces caractéristiques de champignons MA peuvent servir d'indicateurs biologiques et pédologiques (Oehl et al. 2010a). Ceci est valable surtout pour les écosystèmes des zones à climat modéré et froid (Palenzuela et al. 2010), mais aussi pour les zones à climat chaud (Tchabi et al. 2008 et 2009; Goto et al. 2011). Les champs à exploitation intensive et unilatérale, et surtout les surfaces de cultures

maraiçhères avec plusieurs cultures par an s'avèreront sans doute déficitaires avec le temps en ce qui concerne la diversité des champignons MA et la formation de mycorhizes. Sur de tels sites, des groupes écologiques de champignons MA peuvent disparaître, comme cela a été observé dans les monocultures de maïs et les pépinières viticoles (Oehl *et al.* 2003, 2005b et 2009). Pour réintroduire les espèces typiques de ces sites, des mesures doivent être prises, telles que la réduction de l'intensité de travail du sol ainsi que la conversion à l'agriculture écologique et à des systèmes culturels avec fertilisation limitée et rotation diversifiée.

## Conclusions

Avec environ 230 espèces recensées dans le monde et plus de 100 en Suisse, les champignons MA sont un groupe

relativement petit de champignons du sol. Plusieurs de ces champignons sont répartis partout dans le monde, d'autres sont spécifiques aux sols et aux écosystèmes ou réagissent de manière sensible au mode et à l'intensité d'exploitation. Les champignons spécifiques peuvent devenir de très bons indicateurs des propriétés du sol ou de l'intensité d'exploitation. Des mesures ciblées pourraient permettre de stimuler les champignons typiques d'un site ou particulièrement efficaces. Une agriculture biologique et intégrée avec des rotations longues et un travail du sol réduit favorise la diversité des champignons MA. Il manque encore des connaissances détaillées pour pouvoir mieux exploiter le potentiel écologique de ces champignons, par exemple pour la nutrition des plantes et la structuration du sol. ■

## Bibliographie

- De la Providencia I. E., de Souza F. A., Fernández F., Delmas N. S. & Declerck S., 2005. Arbuscular mycorrhizal fungi reveal distinct patterns of anastomosis and hyphal healing mechanisms between different phylogenetic groups. *New Phytologist* **165**, 261–271.
- Gamper H. A., Walker C. & Schüßler A., 2009. *Diversispora celata* sp. nov.: molecular ecology and phylotaxonomy of an inconspicuous arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytologist* **182**, 495–506.
- Goto B. T., Silva G. A., Maia L. C., Souza R. G., Coyne D., Tchabi A., Lawouin L., Hountondji F. & Oehl F., 2011. *Racocetra tropicana*, a new species in the Glomeromycetes from tropical areas. *Nova Hedwigia* **92**, 69–82.
- Jansa J., Mozafar A., Anken T., Ruh R., Sanders I. R. & Frossard E., 2002. Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. *Mycorrhiza* **12**, 225–234.
- Jansa J., Mozafar A., Kuhn G., Anken T., Ruh R., Sanders I. R. & Frossard E., 2003. Soil tillage affects the community structures of mycorrhizal fungi in maize roots. *Ecological Applications* **13**, 1164–1176.
- Jansa J., Mozafar A. & Frossard E., 2005. Phosphorus acquisition strategies within arbuscular mycorrhizal fungal community of a single field site. *Plant and Soil* **276**, 163–176.
- Mäder P., Vierheilig H., Streitwolf-Engel R., Boller T., Frey B., Christie P. & Wiemken A., 2000. Transport of 15-N from a soil compartment separated by a polytetrafluoroethylene membrane to plant roots via the hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* **146**, 155–161.
- Neumann E. & George E., 2004. Colonisation with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* (Nicol. & Gerd.) enhanced phosphorus uptake from dry soil in Sorghum bicolor (L.). *Plant and Soil* **261**, 245–255.
- Oehl F. & Sieverding E., 2004. *Pacispora*, a new vesicular-arbuscular mycorrhizal fungal genus in the Glomeromycetes. *J. Applied Botany and Food Quality* **78**, 72–82.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Mäder P., Boller T. & Wiemken A., 2003. Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of Central Europe. *Applied and Environmental Microbiology* **69**, 2816–2824.
- Oehl F., Sieverding E., Mäder P., Dubois D., Ineichen K., Boller T. & Wiemken A., 2004. Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia* **138**, 574–583.
- Oehl F., Redecker D. & Sieverding E., 2005a. *Glomus badium*, a new sporocarpic arbuscular mycorrhizal fungal species from European grasslands of higher soil pH. *J. Applied Botany and Food Quality* **79**, 38–43.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Ris E.-A., Boller T. & Wiemken A., 2005b. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. *New Phytologist* **165**, 273–283.
- Oehl F., Sýkorová Z., Redecker D., Wiemken A. & Sieverding E., 2006. *Acaulospora alpina*, a new arbuscular mycorrhizal fungal species characteristic for high mountainous and alpine regions of the Swiss Alps. *Mycologia* **98**, 286–294.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Mäder P., Wiemken A. & Boller T., 2009. Distinct sporulation dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal communities from different agroecosystems in long-term microcosms. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **134**, 257–268.
- Oehl F., Laczko E., Bogenrieder A., Stahr K., Bösch R., van der Heijden M. G. A. & Sieverding E., 2010a. Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil Biology & Biochemistry* **42**, 724–738.
- Oehl F., Jansa J., de Souza F. A. & Silva G. A., 2010b. *Cetraspora helvetica*, a new ornamented species in the Glomeromycetes from Swiss agricultural fields. *Mycotaxon* **114**, 71–84.
- Oehl F., Sýkorová Z., Błaszczkowski J., Sánchez-Castro I., Coyne D., Tchabi A., Lawouin L., Hountondji F.C.C., Silva G.A., 2011. *Acaulospora sieverdingii*, an ecologically diverse new fungus in the Glomeromycota, described from lowland temperate Europe and tropical West Africa. *J. Applied Botany and Food Quality* **84**, 47–53.
- Palenzuela J., Barea J. M., Ferrol N., Azcón-Aguilar C. & Oehl F., 2010. *Entrophospora nevadensis*, a new arbuscular mycorrhizal fungus from Sierra Nevada National Park (southeastern Spain). *Mycologia* **102**, 624–632.
- Rillig M. C., Mummey D. L., 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* **171**, 41–53.
- Spain J. L., Sieverding E. & Oehl F., 2006. *Appendicispora*, a new genus in the arbuscular mycorrhizal-forming Glomeromycetes, with a discussion of the genus *Archaeospora*. *Mycotaxon* **97**, 163–182.
- Sýkorová Z., Ineichen K., Wiemken A. & Redecker D., 2007a. The cultivation bias: different communities of arbuscular mycorrhizal fungi detected in roots from the field, from bait cultures transplanted to the field, and a greenhouse trap experiment. *Mycorrhiza* **18**, 1–14.

**Riassunto**
**Funghi micorrizici arbuscolari quali indicatori biologici nei terreni agricoli svizzeri**

La maggior parte delle piante coltivate e selvatiche cresce in simbiosi con un gruppo speciale di funghi, i funghi micorrizici arbuscolari (funghi MA). I funghi MA svolgono funzioni importanti in tutti gli ecosistemi popolati da vegetali. Per mezzo delle ife miceliali si estendono nel terreno e trasferiscono alle piante i nutrienti vitali ivi presenti, proteggendole da stress e siccità. Riducono le perdite di sostanze nutritive dal terreno e possono limitare l'erosione attraverso l'inverdimento, accrescendo la stabilità degli ecosistemi. I funghi MA sembrano particolarmente adatti anche come bioindicatori dato che questo gruppo di funghi, che conta attualmente 230 specie, è relativamente piccolo e contiene specie sia comuni che rare. In Svizzera ne sono state finora rilevate oltre 100 specie. Molti di questi funghi reagiscono in maniera considerevole all'intensità della lavorazione del terreno, alla forma di coltivazione e/o alle proprietà del suolo (p.es. *Glomus sinuosum* e *Acaulospora paulinae*). Queste specie di funghi MA specializzate sono quindi molto adatte per essere impiegate come indicatori biologici. Altre specie sono presenti in quasi tutti i terreni e possono essere indicate come specie generiche (p.es. *Gl. fasciculatum* e *Archaeospora trappei*). Dai nostri studi è emerso che una moltitudine di funghi MA si addicono a essere utilizzate quali indicatori biologici nei terreni usufruiti a scopo agricolo.

**Summary**
**Arbuscular mycorrhizal fungi as bio-indicators in Swiss agricultural soils**

The majority of agricultural crops as well as wild plants form a symbiotic relationship with a special group of soil fungi, the arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi). AM fungi perform important functions in all ecological systems colonised by plants. They form a dense network of fungal hyphal mycelia in the soil and transmit vital nutrients from the soil to the plants and protect them against stress and drought. AM fungi have the ability to reduce nutrient loss from the soil and they can, through biological stabilisation of the soil structure, reduce erosion and thus contribute to ecosystem stability. AM fungi would appear to be particularly suitable as bioindicators because this group of fungi is small enough to be manageable and includes both common and rare species. To date more than 100 AM fungi have been identified in Switzerland. Many of these fungi respond specifically to land use intensity, cultivation practices and/or soil type (e.g. *Glomus sinuosum* and *Acaulospora paulinae*). These specialised AM fungi are therefore highly suitable as bioindicators. Other species occur in almost every kind of soil and may be described as generalists (e.g. *Gl. fasciculatum* and *Archaeospora trappei*). Our studies show that a large number of AM fungi are suitable as bioindicators in agricultural soils.

**Key words:** arbuscular mycorrhizal fungi, biodiversity, bioindicators, sustainable agriculture, organic farming, conservation tillage.

- Sýkorová Z., Wiemken A. & Redecker D., 2007b. Co-occurring *Gentiana verna* and *Gentiana acaulis* and their neighboring plants in two Swiss upper montane meadows harbor distinct *arbuscular mycorrhizal fungal* communities. *Applied and Environmental Microbiology* **73**, 5426–5434.
- Schmid T., Meyer J. & Oehl F., 2008. Integration of *mycorrhizal inoculum* in high alpine revegetation. In: *Mycorrhiza Works*. (Eds Feldmann F, Kapulnik Y, Baar J). Proceedings of the International Symposium «Mycorrhiza for Plant Vitality» and the Joint Meeting of Working Groups 1–4 of COST Action 870. Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany. 278–288.
- Tchabi A., Coyne D., Hountondji F., Lawouin L., Wiemken A. & Oehl F., 2008. *Arbuscular mycorrhizal fungal* communities in sub-Saharan savannas of Benin, West Africa, as affected by agricultural land use intensity and ecological zone. *Mycorrhiza* **18**, 181–195.
- Tchabi A., Hountondji F., Lawouin L., Coyne D. & Oehl F., 2009. *Racocetra beninensis* from sub-Saharan savannas: a new species in the Glomeromycetes with ornamented spores. *Mycotaxon* **110**, 199–209.
- Tchabi A., Coyne D., Hountondji F., Lawouin L., Wiemken A., & Oehl F., 2010. Efficacy of indigenous *arbuscular mycorrhizal fungi* for promoting white yam (*Dioscorea rotundata*) growth in West Africa. *Applied Soil Ecology* **45**, 92–100.
- van der Heijden M. G. A., 2010. *Mycorrhizal fungi* reduce nutrient loss. *Ecology* **91**, 1163–1171.
- van der Heijden M. G. A., Klironomos J. N., Ursic M., Moutoglou P., Streitwolf-Engel R., Boller T., Wiemken A., Sanders I. R., 1998. *Mycorrhizal fungal* diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* **396**, 69–72.
- Verbruggen E., Rölling W. F. M., Gamper H. A., Kowalchuk G. A., Verhoef H. A., van der Heijden M. G. A., 2010. Positive effects of organic farming on below-ground mutualists: large-scale comparison of *mycorrhizal fungal* communities in agricultural soils. *New Phytologist* **186**, 968–979.