

Champignons mycorhiziens arbusculaires: bio-indicateurs dans les sols agricoles

Fritz Oehl¹, Hans-Rudolf Oberholzer¹, Marcel G. A. van der Heijden¹, Endre Laczko², Jan Jansa³ et Simon Egli⁴

¹Agroscope, Institut des sciences en durabilité agronomique IDU, 8046 Zurich, Suisse

²Université de Zurich, Functional Genomics Center, 8057 Zurich, Suisse

³Academy of Sciences of the Czech Republic, 14220 Prague 4 – Krc, République tchèque

⁴Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, 8903 Birmensdorf, Suisse

Renseignements: Fritz Oehl, e-mail: fritz.oehl@agroscope.admin.ch



Figure 1 | Les sols agricoles suisses recèlent un grand nombre de champignons mycorhiziens arbusculaires, dont l'abondance et la variété peuvent être décimées lorsque l'exploitation des terres implique un travail du sol régulier: terres cultivées et herbages à Niederösch (BE). (Photo: Fritz Oehl, Agroscope)

Introduction

A l'exception de travaux pionniers, les études de diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (champignons MA, glomérromycètes) n'existent que depuis environ 25 ans. A cette époque, seul environ un tiers des 300 espèces de champignons MA recensées aujourd'hui dans le monde était connu. En Suisse, ce type d'études a commencé il y a une dizaine d'années seulement, bien que les effets positifs de ces champignons sur la croissance et la santé des plantes ainsi que sur la structure du sol soient connus depuis la fin du 19^e siècle.

Les études réalisées jusqu'à ce jour en Suisse portaient sur l'influence générale des systèmes d'exploitation et de culture sur la diversité des champignons MA

dans les sols agricoles (p. ex. Oehl *et al.* 2005; Maurer *et al.* 2014; Köhl *et al.* 2014; Njeru *et al.* 2015; Säle *et al.* 2015). Toutes les études ont montré que certaines espèces étaient présentes dans toutes les surfaces étudiées. D'autres espèces semblaient avoir un schéma de diffusion particulier en fonction du mode d'exploitation et des propriétés du sol. Aucune étude de diversité à grande échelle sur les sols agricoles de Suisse (fig. 1) n'avait toutefois été réalisée jusqu'ici. Une telle étude pourrait confirmer les résultats plutôt ponctuels obtenus jusqu'ici et renforcer la fiabilité d'un nombre nettement plus important d'espèces indicatrices pour des utilisations particulières, différents paramètres du sol et d'autres facteurs environnementaux (Oehl *et al.* 2011a).

Dans le cadre d'une étude visant à élaborer une valeur de référence pour le potentiel d'infection des mycorhizes comme paramètre de la biologie du sol en vertu de la protection des sols en Suisse, des échantillons de sol provenant de 154 sites cantonaux et nationaux d'observation des sols (KABO¹, NABO²) ont également servi à déterminer les champignons MA. Les résultats de ces études de diversité sont présentés dans la suite de l'article. D'autres résultats de l'étude globale ont déjà été publiés ailleurs (Jansa *et al.* 2009; 2014). Cette étude pose les bases d'une future utilisation des communautés de champignons MA pour une agriculture durable et une protection efficace des sols.

Matériel et méthode

Sites d'études

Parmi les 697 sites du NABO et les différents sites du KABO, 92 sites herbagers et 62 sites cultivés ont été sélectionnés comme sites représentatifs de la Suisse (Jansa *et al.* 2014). Les sites d'herbages étudiés se situent

¹ KABO: programme cantonal d'observation des sols.

² NABO: Observatoire national des sols.

entre 270 et 2240 m d'altitude et les sites cultivés entre 324 et 750 m. De février à juillet, un échantillon de sol a été prélevé sur chaque site au début du printemps sur une surface d'environ 100 m² (0–10 cm pour les sites d'herbages et 0–20 cm pour les sites cultivés; environ 300 g de terre à partir de 20 carottes). Les échantillons de sols ont été passés à travers des tamis de 2 mm et conservés à l'air libre jusqu'à isolement et détermination morphologique des spores de champignons MA. Les informations relatives à la situation géographique des surfaces ainsi qu'une sélection des résultats des analyses chimiques, physiques et microbiologiques du sol réalisées à partir de ces mêmes échantillons sont réunies dans la figure 2 et le tableau 1.

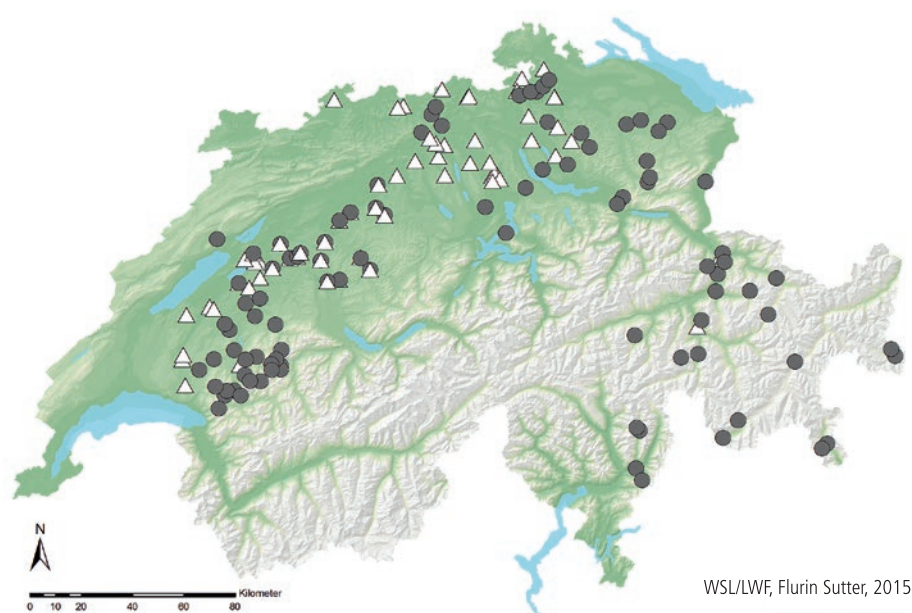
Détermination des champignons MA

Les spores des champignons MA ont été isolés à partir de 25 g de sol séché à l'air libre à l'aide d'une méthode associant le tamisage à une technique de centrifugation en gradient de densité (Oehl et al. 2005). Ils ont ensuite été déterminés et comptés sous un microscope optique capable de grossir 400 fois. Les ouvrages de Blaszkowski (2012) et la classification selon Oehl et al. (2011b) sont les manuels de référence qui ont servi à la détermination compte tenu du développement de la systématique des gloméromycètes (www.agroscope.ch/saf).

Statistique

Le nombre de spores a été exprimé pour chaque espèce et chaque site en nombre de spores par 100 g de sol >

Résumé Les champignons mycorhiziens arbusculaires (champignons MA) sont des champignons du sol qui vivent en symbiose efficace avec la plupart des plantes cultivées et sauvages. Ils stimulent la croissance des plantes et la structure du sol. Des études réalisées en Suisse permettent de supposer que certaines espèces pourraient servir de bioindicateurs pour différents sols ainsi que pour différents types d'exploitation des sols. Un projet de plus grande envergure a étudié les champignons MA (communautés de spores) de 154 sites d'herbages et de cultures dans toute la Suisse. 106 des quelque 300 espèces recensées dans le monde ont pu être identifiées. Tandis que de nombreuses espèces étaient présentes sur presque toutes les surfaces étudiées, d'autres présentaient un schéma de diffusion typique. Outre des espèces connues comme *Septoglomus constrictum* (espèce indicatrice des herbages et des cultures où le travail du sol est réduit) et *Funneliformis caledonius* (espèce indicatrice des terres cultivées acides, régulièrement labourées), l'espèce *Glomus macrocarpum* a notamment été identifiée comme espèce indicatrice des herbages, *Acaulospora alpina* comme espèce indicatrice des zones situées à plus 1400 m d'altitude, *Giga-spora margarita* et *Cetraspora helvetica* des zones de basse altitude jusqu'à 1100 m. D'autres études permettront de savoir quelles sont les prestations écologiques particulières de ces espèces.



WSL/LWF, Flurin Sutter, 2015

Figure 2 | Répartition des 92 sites d'herbages et des 62 sites de terres cultivées sélectionnés en Suisse (points gris: herbages, triangles blancs: cultures).

Tableau 1 | Altitude et paramètres chimiques, physiques et microbiologiques du sol des 92 sites d'herbages et 62 sites de terres cultivées

	Minimum		Médiane		Maximum	
	Herbages	Terres cultivées	Herbages	Terres cultivées	Herbages	Terres cultivées
Altitude (m)	270	324	722	517	2240	750
Teneur en argile (%)	10,6	8,2	24,9	19,2	55,1	50,1
Teneur en limon (%)	11,3	11,4	28,3	29,7	50,7	70,5
Teneur en sable (%)	4,3	6,5	33,3	41,5	69,3	71,4
pH (H ₂ O)	4,7	5,8	6,3	6,6	7,3	7,7
Teneur en calcaire (mg/kg)	0,0	0,0	1,0	1,0	330,0	370,0
Saturation en cations (%)	2,9	26,2	55,4	64,1	93,4	100,0
Carbone organique (g C _{org} / kg)	17,5	7,9	53,5	21,6	215,7	92,9
Azote total (g N / kg)	1,7	0,8	5,2	2,0	15,9	10,7
Phosphore total (mg P / kg)	401,0	468,6	1108	809,4	3340	2261
Phosphore disponible (mg P / kg)	3,2	13,0	37,8	52,4	371,0	252,4
Potassium disponible (mg K / kg)	49,7	56,4	150,5	167,5	716,6	560,1
Cadmium disponible (mg Cd / kg)	0,04	0,04	0,19	0,12	0,98	0,70
Respiration du sol (mg CO ₂ -carbone / kg / h)	0,71	0,27	1,60	0,61	5,37	1,92
Biomasse microbienne déterminée par la respiration induite par le substrat (SIR; mg C / kg)	508,1	165,5	1303	563,7	5880	2160

séché à l'air libre. Des régressions linéaires ont été calculées entre les altitudes (en m) ou entre les pH et la richesse des espèces de champignons MA sur les sites. Une analyse de redondances multicritères (RDA) a permis de calculer les relations entre le nombre de spores et les paramètres écologiques associés et de les représenter graphiquement (Såle et al. 2015). Le package fonctionnel «vegan» de la collection de programmes statistiques R a été utilisé dans ce but (www.R-project.org).

Résultats et discussion

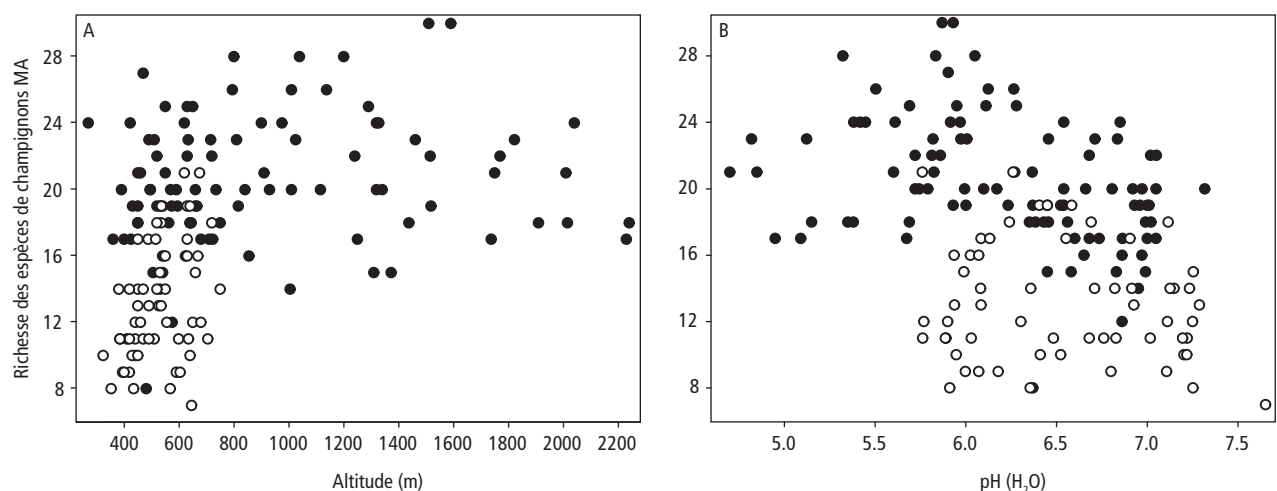
Richesse des espèces de champignons MA dans l'étude

Cette étude a permis de différencier 106 espèces de champignons MA au total (tabl. 2), soit deux espèces de plus

que ce qui avait été recensé en Suisse jusqu'ici (Oehl et al. 2010b). Ce nombre élevé peut venir de la multiplicité des sites étudiés, mais aussi et surtout du progrès taxonomique des dernières années, au cours desquelles plusieurs nouvelles espèces ont été décrites en Suisse également (p. ex. *Dominikia compressa* et *Do. bernensis*; Oehl et al. 2014, 2015). En général, les résultats suivants confirment les observations ponctuelles des études antérieures et fournissent des détails supplémentaires sur la diffusion des champignons MA dans les sols agricoles en Suisse.

Différences dans les herbages et les terres cultivées

La richesse des espèces des champignons MA était en général plus élevée dans les herbages (14–32 espèces par site) que dans les terres cultivées (8–22 espèces; fig. 3).


Figure 3 | Richesse des espèces de champignons mycorhiziens arbusculaires sur 92 sites d'herbages (points noirs) et 62 sites de terres cultivées (points blancs) en Suisse en fonction de l'altitude (A) et du pH (B).

Cela correspond globalement aux résultats des études antérieures (p. ex. Oehl *et al.* 2005, 2010a), qui ont montré qu'une série de champignons MA est décimée, voire totalement évincée des terres cultivées essentiellement du fait du travail périodique du sol. Dans des cas particuliers, des sites de cultures extensives conduites dans les règles de l'agriculture biologique, sans labour ou avec un travail du sol limité, peuvent toutefois avoir une diversité des espèces semblable à celle des prairies ou des pâturages (Oehl *et al.* 2009; Säle *et al.* 2015).

Dans les herbages, la richesse des espèces n'a pas varié avec l'altitude ($r^2 = 0,01$; $p = 0,27$), alors que dans les terres cultivées, elle augmentait légèrement plus on montait (avec un coefficient de détermination relativement bas $r^2 = 0,11$; $p = 0,009$). Les terrains en pente sont généralement exploités en ménageant davantage les sols afin de mieux les protéger contre l'érosion, ce qui pourrait expliquer l'augmentation de la richesse des espèces. L'augmentation pourrait aussi venir du fait que les assolements sont simplifiés dans les zones d'altitude. La richesse des espèces diminuait légèrement avec l'augmentation du pH du sol dans les herbages ($r^2 = 0,14$; $p = 0,00024$), mais pas dans les terres cultivées ($r^2 = 0,02$; $p = 0,33$). Ce phénomène devrait venir du spectre nettement plus limité du pH dans les terres cultivées (de 5,8 à 7,7) par rapport aux herbages (de 4,8 à 7,3; tabl. 1).

Champignons MA comme bioindicateurs

Sur les 106 champignons MA identifiés, près d'un tiers des espèces, par exemple *Rhizoglyphus irregulare* et *Claroideoglyphus claroideum* (fig. 4), ont pu être identifiées dans la plupart des sites d'herbages et de terres cultivées. Par contre, près de 50 % des espèces n'étaient présentes que sur certains sites. Les espèces très fréquentes comme les espèces très rares ne conviennent pas comme bioindicateurs. En revanche, les espèces qui présentent un schéma de diffusion caractéristique pour l'ensemble de la Suisse sont de bons bioindicateurs, par exemple *Glomus macrocarpum* pour les prairies, *Funneliformis caledonius* pour les terres cultivées, *Fu. caledonius* et *Acaulospora alpina* pour les pH acides ou *Ac. alpina* pour les sites d'altitude à partir de 1400 m, *Gigaspora margarita* et *Cetranspora helvetica* pour les zones de basse altitude jusqu'à 1100 m (fig. 4 et fig. 5). Les résultats obtenus pour les espèces citées correspondent à une observation au moins, tirée d'études antérieures (Oehl *et al.* 2006, 2010a, 2012; Maurer *et al.* 2014; Wetzler *et al.* 2014). *Septoglyphus constrictum* et *Gl. badium* sont aussi des indicateurs pour les sites d'herbages ou les terres cultivées avec un travail du sol réduit (Oehl *et al.* 2010a; Maurer *et al.* 2014; Säle *et al.* 2015). L'analyse multicritères de la figure 6 montre que c'est clairement le cas pour ces deux

espèces, qui privilégient également les pH supérieurs à 6,0 (Oehl *et al.* 2005).

Les analyses multicritères confirment, quand il s'agit d'expliquer la présence des champignons MA, que de nombreuses espèces se comportent de manière indifférente. Elles sont regroupées au centre de la figure et ne

Tableau 2 | Liste des 106 espèces de champignons MA identifiées dans les 92 sites d'herbages et les 62 sites de terres cultivées

Archaeosporales

Ambisporaceae:

Ambispora appendicula, *Am. fennica*, *Am. gerdemanni*, *Am. nicolsonii*, *Am. reticulata*, *Am. sp. CH1*, *Am. sp. CH2*, *Am. sp. CH4*, *Am. sp. AR5*

Archaeosporaceae:

Archaeospora myriocarpa, *Ar. trappei*, *Ar. sp. CH1*, *Palaeospora spainii*

Diversisporales

Acaulosporaceae:

Acaulospora alpina, *Ac. capsicula*, *Ac. cavernata*, *Ac. elegans*, *Ac. gedanensis*, *Ac. laevis*, *Ac. longula*, *Ac. mellea*, *Ac. morrowiae*, *Ac. paulinae*, *Ac. punctata*, *Ac. pustulata*, *Ac. scrobiculata*, *Ac. sieverdingii*, *Ac. thomii*, *Ac. tortuosa*, *Ac. sp. AR6*, *Ac. sp. CH1*, *Ac. sp. CH2*, *Ac. sp. GE1*

Diversisporaceae:

Corymbiglosum tortuosum, *Diversispora celata*, *Di. epigaea*, *Di. przelewicensis*, *Tricispora nevadensis*, *Tr. sp. CH1*, *Tr. sp. CH2*

Pacisporaceae:

Pacispora coralloidea, *Pa. dominikii*, *Pa. franciscana*, *Pa. sp. CH1*

Sacculosporaceae:

Sacculospora sp. CH1

Gigasporales

Gigasporaceae:

Gigaspora decipiens, *Gi. margarita*, *Gi. sp. CH1*

Racocetraceae:

Cetranspora armeniaca, *Ce. helvetica*, *Ce. pellucida*, *Ce. sp. CH1*, *Racocetra castanea*, *Ra. fulgida*, *Ra. sp. CH1*, *Ra. sp. CH2*

Scutellosporaceae:

Scutellospora arenicola, *Sc. calospora*, *Sc. dipurpureus*

Glomerales

Entrophosporaceae:

Claroideoglyphus claroideum, *Cl. etunicatum*, *Cl. lamellosum*, *Cl. luteum*, *Cl. sp. CH1*, *Entrophospora infrequens*, *En. sp. AR1*

Glomeraceae:

Dominikia aurea, *Do. bernensis*, *Do. compressa*, *Do. sp. BR11*, *Funneliformis caledonius*, *Fu. coronatus*, *Fu. fragilistratus*, *Fu. geosporus*, *Fu. mosseae*, *Glomus badium*, *Gl. diaphanum*, *Gl. heterosporum*, *Gl. macrocarpum*, *Gl. microcarpum*, *Gl. mortonii*, *Gl. sp. CH1*, *Gl. sp. CH2*, *Gl. sp. CH3*, *Gl. sp. CH4*, *Gl. sp. CH5*, *Rhizoglyphus aggregatum*, *Rh. clarum*, *Rh. fasciculatum*, *Rh. intraradices*, *Rh. irregulare*, *Rh. invermaium*, *Rh. microaggregatum*, *Sclerocystis pachycaulis*, *Sc. rubiformis*, *Sc. sinuosa*, *Septoglyphus altomontanum*, *Se. constrictum*, *Se. sp. GE1*, *Simiglosum hoi*

Paraglomerales

Paraglomeraceae:

Paraglosum lacatum, *Pg. occultum*, *Pg. sp. AG1*, *Pg. sp. BE10*, *Pg. sp. BR1*, *Pg. sp. VS1*

Les abréviations utilisées pour les espèces de champignons dont la détermination est incertaine ou qui n'ont pas encore été décrites correspondent au lieu où les champignons ont été identifiés. CH = ensemble du territoire suisse, AR = région alpine, BR = région de Bâle, BE = Berne, GE = région du lac Léman, AG = Argovie, VS = Valais.

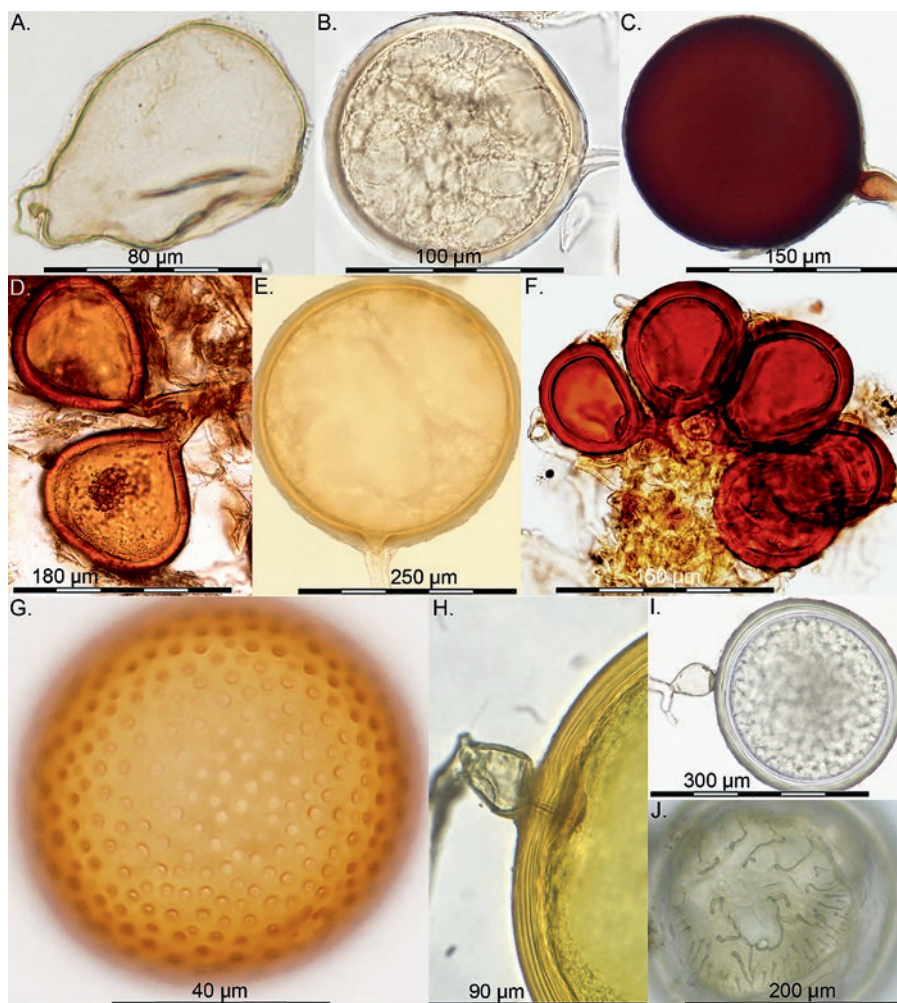


Figure 4 | Illustration de neuf espèces de champignons MA très fréquents (A et B) ou à présence très sélective (C à J). A: *Rhizoglossum irregulare* (partout). B: *Claroideoglossum claroideum* (partout). C: *Septoglossum constrictum* (fréquent dans les herbages). D: *Glomus badium* (fréquent dans les herbages). E: *Glomus macrocarpum* (presque exclusivement dans les herbages). F: *Funneliformis caledonius* (presque exclusivement dans les terres cultivées). G: *Acaulospora alpina* (1400–2240 m). H: *Gigaspora margarita* (270–1100 m). I-J: *Cetraspora helvetica* (270–650 m). (Photos: Fritz Oehl, Agroscope)

peuvent pas être attribuées à des vecteurs ou des groupes de vecteurs, ou plus précisément aux paramètres écologiques associés à la base de ces vecteurs (fig. 6). Toutefois, d'autres espèces comme *Se. constrictum*, *Gl. badium* et *Do. aurea*, peuvent clairement être attribuées aux vecteurs qui sont liés à la teneur en humus des sols (C_{org} , N_{tot} ainsi que les paramètres microbiens de la respiration induite par le substrat [SIR] et de la respiration du sol). L'abondance de *Fu. mosseae* et de *Fu. geosporus* par contre semble plutôt être liée aux paramètres écologiques du pH et de la teneur en calcaire. *Funneliformis caledonius* et *Gl. diaphanum* se regroupent près des paramètres d'exploitation du sol (intensité et type d'exploitation) et de la disponibilité en phosphore, tandis que *Gl. macrocarpum* se comporte à l'inverse de ces deux espèces de champignons MA et des paramètres précédemment cités. Pour certaines des espèces citées ici,

les résultats des analyses multicritères confirment parfaitement les observations antérieures (Oehl *et al.* 2005, 2006, 2010a, 2011a; Maurer *et al.* 2014; Säle *et al.* 2015). Il est cependant surprenant de constater que certaines espèces qui passaient jusqu'ici plutôt pour des espèces ubiquistes («présentes partout»), présentaient des limites marquées dans leur diffusion. *Fu. mosseae* n'a par exemple pas été trouvée à plus de 1600 m et *Gi. margarita* pas à plus de 1100 m. Pour les autres espèces comme *Sclerocystis rubiformis*, *Ac. paulinae* et *Ac. cavernata*, qui se regroupent avec le vecteur de l'altitude et dans une mesure opposée avec les paramètres d'exploitation du sol ainsi que le pH, de telles estimations biogéographiques sont totalement nouvelles. L'étude actuelle est la première à identifier un nombre aussi important d'espèces de champignons MA susceptibles de servir de bioindicateurs. Cela tient sans doute au grand nombre de sites étu-

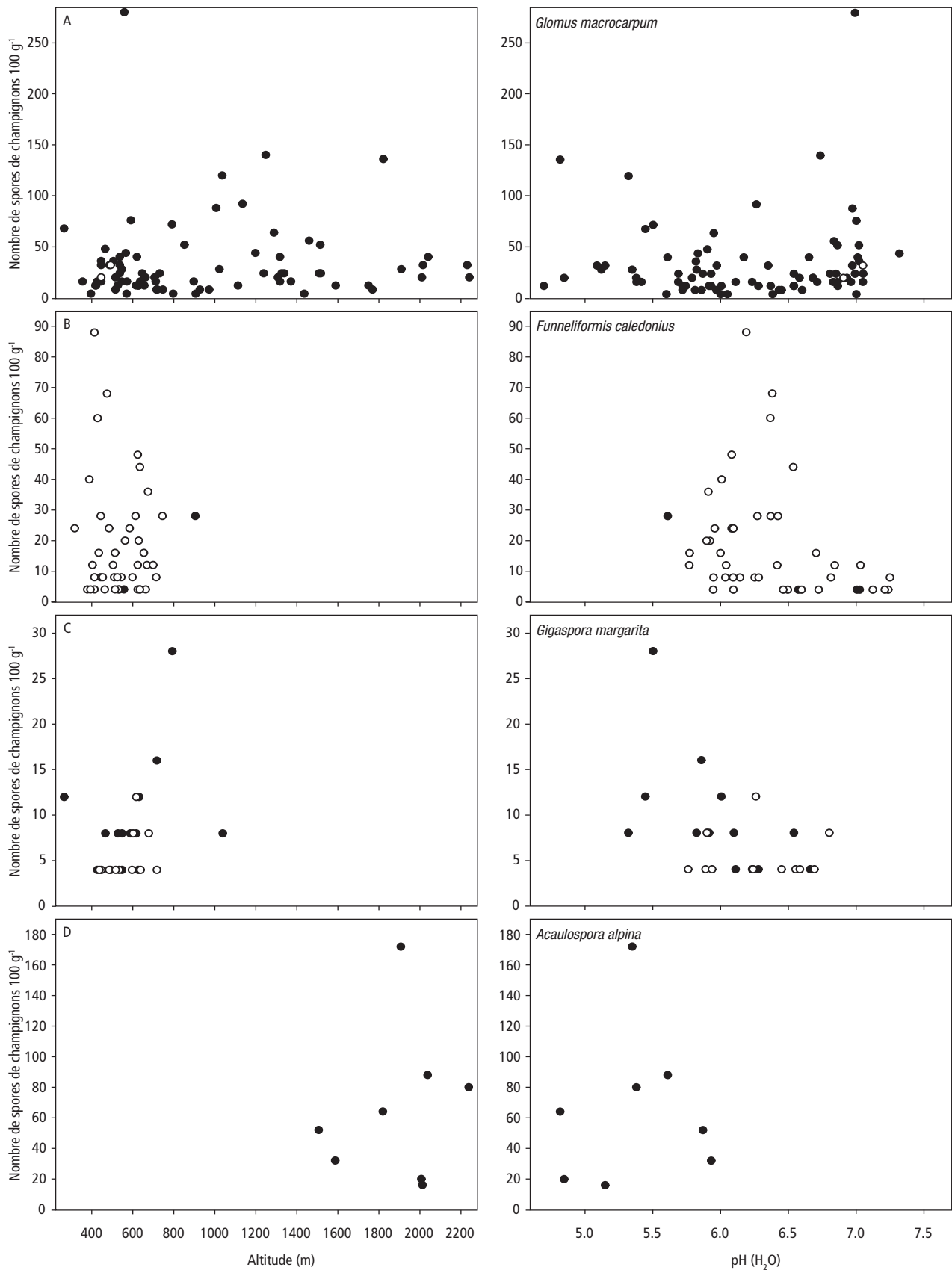


Figure 5 | Quatre exemples de champignons MA qui présentent un schéma de diffusion évident en fonction du type d'exploitation des terres (herbages ou terres cultivées), de l'altitude et du pH. A: *Glomus macrocarpum* n'est présent que dans les herbages (points noirs). B: *Funneliformis caledonius* n'est présent que dans les terres cultivées (points blancs). C: *Gigaspora margarita* ne se trouve qu'à une altitude inférieure à 1100 m. D: *Acaulospora alpina* est présente uniquement à une altitude supérieure à 1400 m. ➤

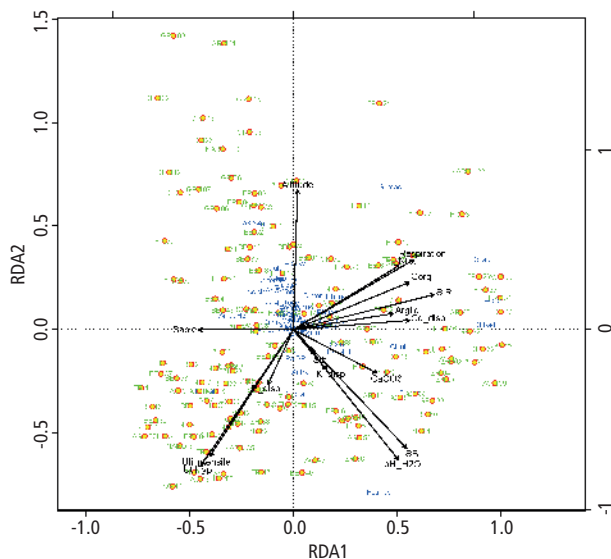


Figure 6 | Analyse de redondance des nombres de spores des 106 espèces de champignons MA identifiées sur les 92 sites d'herbages et les 62 sites de terres cultivées en Suisse compte tenu des paramètres écologiques associés. Nom de l'espèce de champignon, voir tabl. 2 | Abréviations des paramètres (dans le sens des aiguilles d'une montre): N_{tot} = teneur d'azote total dans le sol, respiration = respiration du sol, C_{org} = teneur en carbone organique, SIR = biomasse microbienne selon la méthode SIR, Cd_{disp} = cadmium disponible, $CaCO_3$ = teneur en calcaire, BS = saturation en cations, pH_{H_2O} = pH (eau), K_{disp} = potassium disponible, P_{disp} = phosphore disponible, UtilIntensite = intensité de l'exploitation des sols, UtilTyp = type d'exploitation des sols.

diés, à la détermination détaillée des espèces ainsi qu'à la multiplicité des paramètres écologiques pris en compte.

Conclusions

Le mycorhize arbusculaire est considéré comme la symbiose la plus répandue entre les plantes et les microorganismes. Pendant longtemps, cette symbiose a été considérée comme non spécifique avec des champignons MA peu nombreux, mais présents dans le monde entier, comme partenaires de symbiose. La symbiose MA est certes non spécifique par rapport à la plante hôte, mais ne l'est pas du tout par rapport aux facteurs géographiques, au mode et à l'intensité du travail du sol ainsi qu'à l'altitude. L'étude actuelle, réalisée à grande échelle, montre au contraire qu'un nombre relativement important de quelque 300 espèces de champignons MA recensées à ce jour dans le monde, a un schéma de diffusion très caractéristique en Suisse et convient donc comme bioindicateurs pour des paramètres spécifiques. Quel est le rôle fonctionnel de telle ou telle espèce dans les différents systèmes ? La réponse à cette question est encore en grande partie inconnue. À l'avenir, l'agriculture pourrait cependant profiter des prestations écosystémiques spécifiques (protection contre l'érosion, efficacité de l'eau et des éléments nutritifs, santé des plantes) de communautés de champignons MA employées de manière ciblée dans le but d'améliorer la protection des sols. Des études ultérieures devraient permettre de savoir quelles prestations particulières sont fournies par les différentes espèces dans les différents écosystèmes. ■

Bibliographie

- Błaszczkowski J., 2012. Glomeromycota. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków. 303 p.
- Jansa J., Oberholzer H.-R. & Egli S., 2009. Environmental determinants of the arbuscular mycorrhizal infectivity of Swiss agricultural soils. *European Journal of Soil Biology* 45, 400–408.
- Jansa J., Erb A., Oberholzer H.-R., Šmilauer P. & Egli S., 2014. Soil and geography are more important determinants of indigenous arbuscular mycorrhizal communities than management practices in Swiss agricultural soils. *Molecular Ecology* 23, 2118–2135.
- Köhl L., Oehl F. & van der Heijden M.G.A., 2014. Using tillage practices to regulate plant growth responses by altering the soil microbial community. *Ecological Applications* 24, 1842–1853.
- Maurer C., Rüdiger M., Chervet A., Stürni W., Fisch R. & Oehl F., 2014. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in field crops using no-till and conventional tillage practices. *Agrarforschung Schweiz* 5, 398–405.
- Njeru E.M., Avio L., Bocci G., Sbrana C., Turrini A., Bärberi P., Giovannetti M. & Oehl F., 2015. Contrasting effects of cover crops on 'hot spot' arbuscular mycorrhizal fungal communities in organic tomato. *Biology and Fertility of Soils* 51, 151–166.
- Oehl F., Palenzuela J., Sánchez-Castro I., Kuss P., Sieverding E., Silva G.A., 2012. *Acaulospora nivalis*, a new fungus in the Glomeromycetes, characteristic for high alpine and nival altitudes of the Swiss Alps. *Nova Hedwigia* 95, 105–122.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Ris E. A., Boller T. & Wiemken A., 2005. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. *New Phytologist* 165, 273–283.
- 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. & 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., van der Heijden M.G.A., Jansa J. & Ineichen K., 2010b. Bodenbiodiversität: Artenvielfalt von nützlichen Mykorrhiza-Pilzen in schweizerischen Landwirtschaftsböden. In: Bieri A. (Hrsg.). Vielfältige Biodiversitäts-Forschung. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich-Reckenholz, *ART-Schriftreihe* 14, 47–57.
- Oehl F., Jansa J., Ineichen K., Mäder P. & van der Heijden M. G. A., 2011a. Champignons mycorhiziens arbusculaires, bioindicateurs dans les sols agricoles suisses. *Recherche Agronomique Suisse* 2 (7–8), 304–311.
- Oehl F., Sieverding E., Palenzuela J., Ineichen K. & Silva G.A., 2011b. Advances in Glomeromycota taxonomy and classification. *IMA Fungus* 2, 191–199.
- Oehl F., Palenzuela J., Sánchez-Castro I., Kuss P., Sieverding E. & Silva G.A., 2012. *Acaulospora nivalis*, a new fungus in the Glomeromycetes, characteristic for high alpine and nival altitudes of the Swiss Alps. *Nova Hedwigia* 95, 105–122.
- Oehl F., Sánchez-Castro I., Palenzuela J., Silva G.A. & Sieverding E., 2014. *Glomus compressum*, a new arbuscular mycorrhizal fungus from different agro-ecosystems in Central Europe. *Nova Hedwigia* 99, 429–439.
- Oehl F., Sánchez-Castro I., Sousa N.M.F., Silva G.A. & Palenzuela J., 2015. *Dominikia bernensis*, a new arbuscular mycorrhizal fungus from a Swiss no-till farming site, and *D. aurea*, *D. compressa*, and *D. indica*, three new combinations in *Dominikia*. *Nova Hedwigia* 101, 65–76.
- Säle V., Aguilera P., Laczko E., Mäder P., Berner A., Zihlmann U., van der Heijden M.G.A. & Oehl F., 2015. Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology & Biochemistry* 84, 38–52.
- Wetzler K., Silva G.A., Matczinski U., Oehl F. & Fester T., 2014. Superior differentiation of arbuscular mycorrhizal fungal communities from till and no-till plots by morphological spore identification when compared to T-RFLP. *Soil Biology & Biochemistry* 72, 88–96.W

Riassunto**I funghi micorrizici arbuscolari come bioindicatori nei terreni agricoli**

I Funghi micorrizici arbuscolari (funghi MA) sono funghi del terreno che creano una simbiosi efficiente con la maggioranza delle piante da reddito e selvatiche. Sono positive per la crescita delle piante e per la struttura del suolo. Da alcuni singoli studi condotti in Svizzera si è potuto desumere che certe specie sono bioindicatori adatti a differenti terreni e tipi di utilizzo degli stessi. In un ampio studio sono stati esaminati i funghi MA (comunità delle spore) di 154 superfici inerbate e coltivate distribuite in tutta la Svizzera. È stato possibile identificare 106 delle appena 300 specie note al mondo. Mentre alcune specie erano presenti in quasi tutte le superfici esaminate, altre mostravano modelli di diffusione peculiari. Oltre alle specie note, quali *Septogloium constrictum* (specie indicatrice per prati e campi con scarsa lavorazione del suolo) e *Funneliformis caledonius* (specie indicatrice per superfici coltivate acide regolarmente arate), sono state individuate, tra le altre, la *Glomus macrocarpum* quale specie indicatrice per prati, l'*Acaulospora alpina* per siti oltre i 1400 m s.l.m. nonché la *Gigaspora margarita* e la *Cetraspora helvetica* per siti ad altitudini inferiori, fino ai 1100 m. Scoprire quali sono i particolari benefici ecosistemici portati da tali specie sarà oggetto di successivi studi.

Summary**Arbuscular mycorrhizal fungi as bioindicators in agricultural soils**

Arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi) are soil fungi that establish an effective symbiosis with most crops and wild plants, promoting plant growth and improving soil structure. Individual studies from Switzerland have led us to assume that certain species are suitable as bioindicators for various soils and land-use types. In a broad-based study, the AM fungi (spore communities) of 154 different grassland and cultivated sites scattered throughout Switzerland were investigated. A total of 106 of the just-under 300 species known worldwide were identified. Whilst many species occurred in almost all of the areas investigated, others exhibited typical patterns of distribution. In addition to known species such as *Septogloium constrictum* (an indicator species for grassland and reduced-tillage arable land) and *Funneliformis caledonius* (an indicator species for regularly ploughed, acidic arable land), other species (a) *Glomus macrocarpum*, (b) *Acaulospora alpina* and (c) *Gigaspora margarita* and *Cetraspora helvetica* were identified as indicator species for grassland, for sites higher than 1400 m.a.s.l., and for low-altitude sites up to 1100m, respectively. The special ecosystem services provided by these species will be the subject of further investigations.

Key words: altitude, arbuscular mycorrhizal fungi, biodiversity, bioindicators, pH, soils, spores, sustainable agriculture.

Remerciements

Nous remercions l'Office fédéral de l'environnement OFEV ainsi que les cantons de St. Gall et de Soleure pour le soutien financier apporté au projet, les offices de protection des sols des cantons d'Argovie, de Berne, de Fribourg, des Grisons, de St. Gall et de Zurich ainsi que l'Observatoire national des sols NABO pour leur aide pour le prélèvement des échantillons et la mise à disposition des données.