

Les systèmes culturaux influencent la diversité des espèces de champignons mycorhiziens

Claudia Maurer¹, Fritz Oehl², Urs Zihlmann³, Andreas Chervet¹ et Wolfgang G. Sturny¹

¹Service de la protection des sols du canton de Berne, 3052 Zollikofen, Suisse

²Agroscope, 8820 Wädenswil, Suisse

³Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: Claudia Maurer, e-mail: claudia.maurer@vol.be.ch



Figure 1 | La plupart des espèces de champignons mycorhiziens se retrouvent dans les prairies permanentes, suivies par les terres cultivées de manière respectueuse du sol, les terres cultivées de manière diversifiée avec une part de prairies temporaires: site d'observation sol à long terme, Niederösch, canton de Berne. Au premier plan, la prairie permanente peu intensive du verger, puis la surface cultivée, avec prairie temporaire en 2009. (Photo: Service de la protection des sols, canton de Berne)

Introduction

Depuis 1994, le canton de Berne a mis en place un système cantonal de surveillance des sols (KABO). Des paramètres chimiques, physiques et biologiques du sol ainsi que des données agronomiques sont relevées et évaluées à intervalles réguliers dans dix-neuf exploitations agricoles du Plateau bernois, ayant chacune une prairie permanente et une surface cultivée comparable sur le plan pédologique (fig. 1). Plusieurs rapports ont fourni des informations sur l'état des sols bernois et proposé des mesures appropriées pour leur utilisation durable (VOL 2017).

En plus de la population de vers de terre et de l'activité microbienne ou de la biomasse microbienne, les cham-

pignons mycorhiziens arbusculaires (champignons MA) constituent un paramètre important de la biologie du sol (Jansa *et al.* 2014). Dans le monde, la plupart des plantes tirent parti des avantages de cette symbiose: le mycélium fongique fin et largement ramifié facilite l'accès de la plante à l'eau et aux nutriments (en particulier le phosphore) et stabilise la structure du sol, réduisant ainsi l'érosion et le compactage et favorisant une bonne infiltration de l'eau (Rillig *et al.* 2015). En contrepartie, le champignon reçoit une partie des hydrates de carbone assimilés par la plante. Le climat, le sol et l'intensité de production ont un effet sur la diversité des champignons MA (Oehl *et al.* 2011a, 2016). Diverses espèces caracté-

ristiques ont pu être identifiées suivant les différentes pratiques agricoles (Maurer *et al.* 2014; Sâle *et al.* 2015). L'objectif de ce travail était de relever et de caractériser la diversité des champignons MA sur douze sites bernois du KABO sélectionnés, d'identifier les corrélations avec les paramètres agronomiques et pédologiques et de nommer les espèces caractéristiques.

Matériel et méthodes

Prélèvement d'échantillons et sites

En avril 2009, des échantillons de sol ont été prélevés à une profondeur de 0-20 cm de sol sur douze sites sélectionnés du KABO (quatre répétitions avec chacune un échantillon mélangé de 20 prélèvements, soit environ 1 kg de terre). Trois prairies permanentes et neuf terres cultivées ont été échantillonnées sur des sols mi-lourds bruns et bruns lessivés. Les sites ont été regroupés en *prairies permanentes* (pas de rompu depuis au moins 30 ans), en *parcelles PER-SD* (*semis direct*; selon les prestations écologiques requises [PER] et pas de travail du sol depuis au moins cinq ans), en *parcelles PER-L* (selon les PER et avec un labour régulier) et en *parcelles BIO-L* (cultivées depuis au moins quinze ans selon les directives de l'agriculture biologique, avec labour régulier voire travail du sol réduit à Hindelbank, tabl. 1). Chaque site s'est vu attribuer un niveau d'intensité de production compris entre 0 (très bas) et 5 (élevé) en fonction de son travail du sol, de ses cultures et de sa fumure (type et quantité, Oehl *et al.* 2016).

Analyses de sol et détermination des champignons MA

Le pH (H₂O), la teneur en carbone organique (C_{org}) et quatre extractions de phosphore différentes ont été déterminés selon les méthodes de référence en vigueur en Suisse et dans l'UE (stations de recherche agronomique ART, ACW 1996; Neyroud et Lischer 2003). Les spores des champignons MA ont été isolées à l'aide d'une technique combinée de tamisage humide et de gradient de densité et déterminées sous un microscope optique à grossissement 400x (Oehl et Koch 2018). Pour les champignons MA, on a utilisé la systématique selon Oehl *et al.* (2011b) ainsi que les adaptations apportées ces dernières années (par ex. Błazkowski *et al.* 2018). La densité des spores a été enregistrée pour chaque espèce en nombre de spores par 100 g de sol séché à l'air.

Evaluation et statistique

Afin de décrire la diversité des champignons MA, les indices de diversité ont été calculés pour chaque site selon Margalef ($d = [S-1] / \ln N$, S = nombre d'espèces trouvées,

Résumé

La diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (champignons MA) a été étudiée sur douze sites utilisés par le canton de Berne pour la surveillance des sols à long terme. Neuf sols suivaient les directives de production des prestations écologiques requises (PER): trois étaient des prairies permanentes et six des terres cultivées, trois avec semis direct (SD) et trois avec labour (L). Enfin, trois autres parcelles labourées étaient exploitées selon les directives de l'agriculture biologique (BIO). Les spores fongiques MA ont été isolées à partir d'échantillons prélevés dans les 20 cm supérieurs du sol et déterminées morphologiquement. Sur les 57 espèces identifiées au total, 40-45 ont été trouvées dans les prairies permanentes, 33-40 dans les parcelles PER-SD, 31-35 dans les parcelles BIO-L et 28-35 dans les parcelles PER-L. En général, les prairies permanentes avaient des densités de spores plus élevées que les sols cultivés. Des espèces caractéristiques ont été identifiées pour chaque système cultural. Un travail respectueux du sol et un long cycle de rotation des cultures avec des prairies temporaires favorisaient les communautés de champignons MA dans les sols cultivés du Plateau bernois. Par rapport à des régions de cultures similaires d'Europe centrale, le nombre d'espèces de champignons MA sur le Plateau bernois est nettement plus élevé.

N = densité totale des spores de toutes les espèces dans un échantillon) et Shannon-Weaver ($H = -\sum [n_i / N] \ln [n_i / N]$, n_i = densité des spores de l'espèce i, N = densité totale des spores de toutes les espèces dans un échantillon). À l'aide d'une analyse de variance ANOVA à sens unique, on a examiné les différences significatives entre les sites, deux par deux. Une analyse de redondance a été utilisée pour clarifier l'impact de l'intensité de production tels que le travail du sol, la rotation et la fumure (tabl. 1) sur les communautés de champignons MA et sur les groupements ou séparations qui en résultent. Le test de Monte Carlo selon Dufrêne et Legendre (1997) a été utilisé pour déterminer les espèces indicatrices (valeur de l'indicateur > 25 %, $p < 0,05$).

Tableau 1 | Caractérisation et regroupement des sites KABO étudiés. Les groupes avec des lettres différentes diffèrent significativement ($p < 0,05$, analyse de variance ANOVA à sens unique).

Site	Abréviation	Directive de production	Culture et nombre d'années de rotation / dont prairie temporaire	Travail du sol	Fumure	Niveau d'intensité de production ¹ (0 = bas, 5 = élevé)	C _{org} ²	pH	P-NaAc ³	P-DL ⁴	P-Citrate ⁵	P _{tot} ⁶	Pourcentage de P-NaAc dans P _{tot}	Pourcentage de P-DL dans P _{tot}
							%	H ₂ O	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%
Prairie permanente														
Rubigen	RUB	PER	Pâturage extensif	aucun	aucune	0	2,02 a	6 c	14,8 bc	49,9 d	48,5 c	1010	1,46	4,94
Niederörsch	NIE	PER	Prairie peu intensive	aucun	aucune	1	1,84 a	5,8 c	11,6 c	23,1 f	35 def	750	1,55	3,08
Langnau	LAN	PER	Pâturage intensif	aucun	organique	2	1,8 b	5,5 de	7,9 c	28,4 ef	40,1 c	820	0,96	3,46
Parcelle semis direct														
Buch	BUC	PER	Blé d'automne, 7/2	aucun – semis direct	minérale et organique	3	1,24 de	6,4 b	23,7 b	70,8 c	38,8 cd	560	4,23	12,64
Rubigen	RUB	PER	Orge d'automne, 7/2	aucun – semis direct	minérale et organique	3	1,67 b	7,1 a	27,7 b	62 cd	27,8 ef	790	3,51	7,85
Zollikofen	OBA	PER	Orge d'automne, 6/0	aucun – semis direct	minérale	3	1,59 bc	5,4 de	11,7 c	54,1 cd	37,7 cde	1870	0,62	2,89
Parcelle PER														
Niederörsch	NIE	PER	Prairie temporaire 5/4	Labour	minérale et organique	4	1,34 d	6 c	20,5 b	60,9 cd	43,1 cd	790	2,59	7,71
Grasswil	GRA	PER	Orge d'automne, 7/4	Labour	minérale et organique	4	1,66 b	5,6 cd	12,2 c	46,8 de	33 def	1000	1,22	4,68
Zollikofen	OBA	PER	Orge d'automne, 6/0	Labour, On Land	minérale	5	1,09 e	5,4 de	10,4 c	47,4 de	43,1 cd	1580	0,66	3,00
Parcelle BIO														
Hindelbank	HIN	BIO	Prairie temporaire, 7/2	Labour, réduit, On Land	organique	3	1,26 de	7,1 a	47 a	134 b	72,6 b	770	6,1	17,4
Bantigen	BAN	BIO	Prairie temporaire, 5/2	Labour	organique	4	1,72 b	5,3 e	5,1 c	36,5 ef	23,8 f	910	0,56	4,01
Uettligen	UET	BIO	Colza avec sous-semis de trèfle, 8/4	Labour, On Land	organique	4	1,4 cd	6,9 a	55,2 a	220 a	106,8 a	755	7,31	29,14

¹Voir Oehl *et al.* (2016).

²C_{org}: carbone organique.

³P-NaAc: extraction de Na-acétate = phosphore facilement disponible.

⁴P-DL: double extraction de lactate = phosphore disponible.

⁵P-Citrate: acide citrique soluble = phosphore difficilement disponible.

⁶P_{tot}: teneur totale en phosphore.

Prairie permanente = pas de rompue depuis au moins 30 ans.

Semis direct = selon les exigences des prestations écologiques requises et sans travail du sol depuis au moins cinq ans.

PER = selon les exigences des prestations écologiques requises, avec labour.

BIO = cultivé depuis au moins quinze ans selon les exigences de l'agriculture biologique, avec labour.

Tableau 2 | Densités de spores par gramme de sol, nombre moyen d'espèces (moyenne de quatre répétitions) et indices de diversité selon Margalef et Shannon-Weaver des sites KABO étudiés. Les groupes avec des lettres différentes diffèrent significativement ($p < 0,05$, analyse de variance ANOVA à sens unique). Voir le tableau 1 pour les abréviations.

Site	Densité des spores g ⁻¹ de sol	Nombre moyen d'espèces de champignons MA	Indices de diversité		
			Margalef	Shannon-Weaver	
Prairie permanente					
Rubigen	RUB	18,0 bc	33,0 a	4,87 bc	2,96 ab
Niederörsch	NIE	16,2 c	34,5 a	5,39 a	3,04 a
Langnau	LAN	21,8 a	34,8 a	4,94 b	2,65 c
Parcelle semis direct					
Buch	BUC	12,6 de	25,5 d	4,07 f	2,67 c
Rubigen	RUB	17,8 c	27,0 cd	4,27 def	2,70 c
Zollikofen	OBA	11,4 e	27,3 cd	4,31 def	2,82 abc
Parcelle PER					
Niederörsch	NIE	11,1 e	30,0 b	4,57 cd	2,66 c
Grasswil	GRA	11,8 e	28,8 bc	4,49 de	2,96 ab
Zollikofen	OBA	13,8 d	20,3 e	3,12 g	2,27 e
Parcelle BIO					
Hindelbank	HIN	13,0 de	30,3 b	4,46 de	2,72 cd
Bantigen	BAN	13,5 de	26,0 d	4,17 ef	2,55 d
Uettligen	UET	19,9 ab	26,5 cd	4,01 f	2,65 c

Résultats et discussion

Paramètres du sol

Comme attendu, les trois prairies permanentes affichaient les teneurs les plus élevées en carbone organique, tandis que les valeurs du pH reflètent la variabilité des sols agricoles bernois (pH [H₂O] 5,3–7,1, tabl. 1). Les prairies permanentes, les sols de semis direct et les terres cultivées selon les PER et labourées ne se différenciaient guère en ce qui concerne la teneur en phosphore. En revanche, les trois sites BIO présentaient des valeurs P variables: le site de Bantigen affichait les valeurs les plus basses, Hindelbank et Uettligen les plus élevées. Ces derniers présentaient une proportion élevée de phosphore facilement disponible (P-NaAc, P-DL, tabl. 1), ce qui est plutôt atypique. Il n'est pas possible d'évaluer si

cela est dû à la fumure organique, à la préparation des engrais de ferme ou à l'historique des deux sols avant la conversion à l'agriculture biologique.

Densité des spores, nombre des espèces et diversité

Les prairies permanentes avec 16–22 g⁻¹ (valeur moyenne 18,7 g⁻¹) affichaient des densités de spores significativement plus élevées (tabl. 2) que les terres cultivées avec 11–20 g⁻¹ (valeur moyenne 13,9 g⁻¹) mis à part Rubigen et Uettligen, qui présentaient une densité de spores aussi élevée que les prairies permanentes. Au total, 57 espèces de champignons MA ont été identifiées, dont 40–45 dans les prairies permanentes, 33–40 dans les sols avec semis direct, 31–35 dans les parcelles bio et 28–35 dans les surfaces PER labourées (tabl. 3). C'est dans les prairies permanentes que le nombre moyen

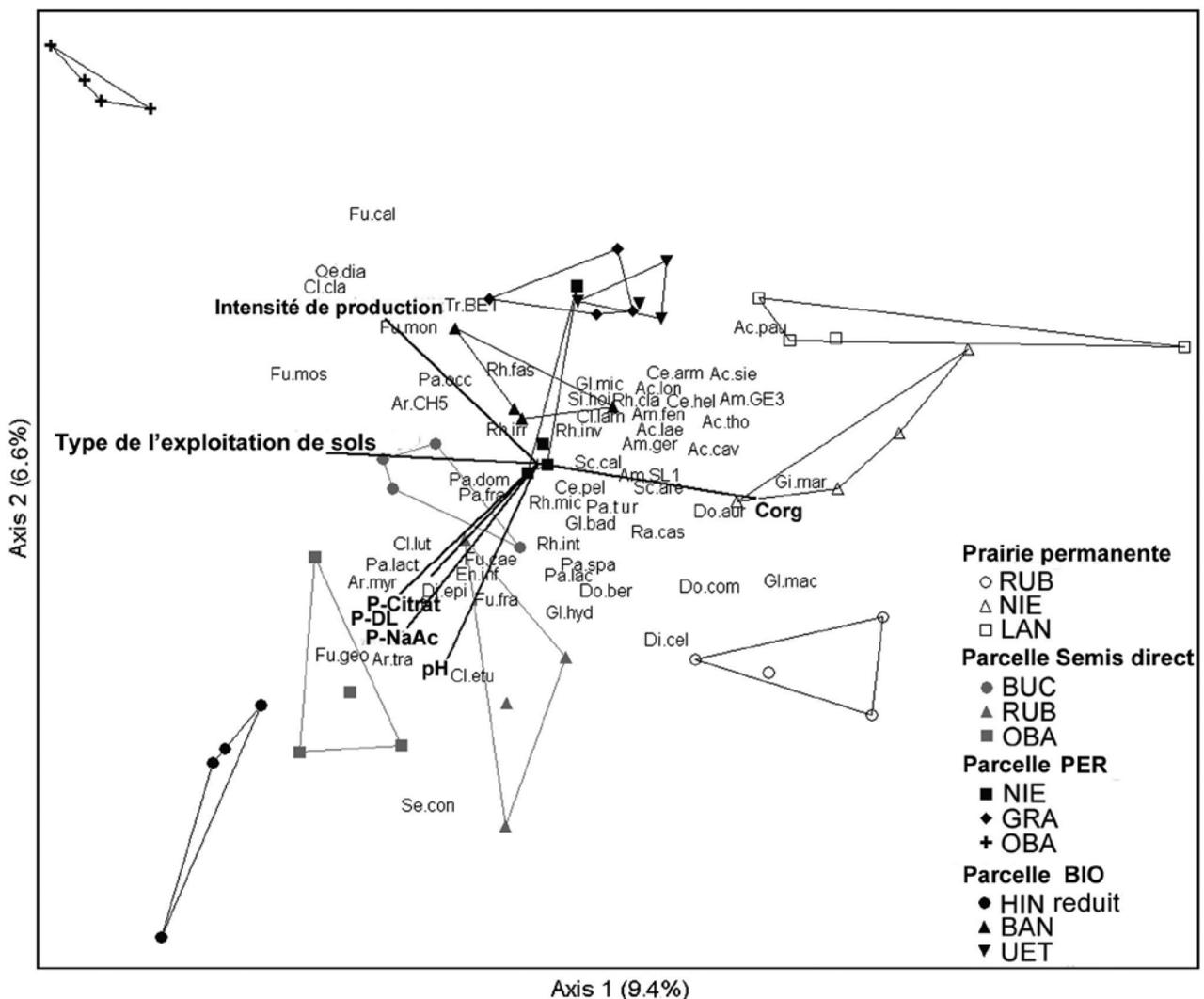


Figure 2 | Analyse de redondance de la densité des spores des espèces de champignons MA, compte tenu des paramètres annexes sur les sites KABO étudiés (voir les tableaux 1 et 2 pour les abréviations).

Tableau 3 | Liste des espèces (abréviations comprises) avec leurs abondances relatives (%) et leurs fréquences ainsi que le nombre d'espèces de champignons MA identifiées au total sur les sites KABO étudiés. Voir le tableau 1 pour les abréviations.

	Prairie permanente			Parcelle semis direct			Parcelle PER			Parcelle Bio			Fréquence ¹ %
	RUB	NIE	LAN	BUC	RUB	OBA	NIE	GRA	OBA	HIN	BAN	UET	
Nombre d'espèces de champignons MA identifiées	40	45	40	36	33	40	35	35	28	35	33	31	
Groupe A: espèces de champignons MA identifiées dans tous les systèmes agricoles													
<i>Acaulospora paulinae</i> (Ac.pau)	3,9	16,2	20,9	2,7	0,7	0,1	7,1	8,2	1,2	2,4	10,2	12,9	100
<i>Ambispora</i> sp. GE3 (Am.GE3)	3,2	3,1	2	0,5	1,8	0,1	0,3	2,1	0,5	0,7	1,6	3,4	100
<i>Archaeospora trappei</i> (Ar.tra)	2,2	1,6	1,8	2,7	1,6	4,9	1	2	1,5	11	2,7	1,2	100
<i>Claroideoglossum luteum</i> (Cl.lut)	1,3	0,8	1,3	1,3	0,8	2,3	1,7	2,8	0,9	5,1	2,6	1,4	100
<i>Dominikia bernensis</i> (Do.ber)	7,7	7	1,7	7,1	6,7	8,8	4,5	9,8	0,3	1,3	2,8	4,1	100
<i>Funneliformis geosporus</i> (Fu.geo)	4,1	4,7	1,7	8,8	5,6	10,5	5,1	1,2	5,5	19,4	6,9	4,9	100
<i>Oehlia diaphana</i> (Oe.dia)	1,4	3,1	2,7	5,6	2,6	5,2	2,2	5	14,5	4,9	5,1	2,9	100
<i>Palaeospora spainii</i> (Pa.spa)	1,3	1,2	0,7	0,8	0,7	1,6	0,9	1	0,4	1,1	1	1,1	100
<i>Paraglossum occultum</i> (Pa.occ)	1,4	1,4	1,1	0,8	1,1	1,1	0,9	2,4	2,3	1,9	0,7	1,1	100
<i>Pa. turpe</i> (Pa.tur)	7,1	3	6,5	2,5	5,7	5,4	1	6,3	5	4,3	0,4	5	100
<i>Rhizoglossum fasciculatum</i> (Rh.fas)	0,5	4	0,5	5,9	0,3	0,2	4,3	4,2	0,8	0,5	0,6	2,8	100
<i>Rh. intraradices</i> (Rh.int)	0,8	0,9	0,5	0,2	1,5	1,6	1,4	0,8	0,3	1	2,1	0,4	100
<i>Rh. invermaium</i> (Rh.inv)	11,7	9,7	10,2	22	22	10,2	33,1	15	1,8	9,3	31,2	28,4	100
<i>Rh. irregularare</i> (Rh.irr)	6	9,6	1,2	4,6	5,1	5,2	6,2	6,6	6,7	4	3,2	3,9	100
<i>Scutellospora calospora</i> (Sc.cal)	1,4	0,9	0,8	1,1	1	1,2	1,1	2,3	0,2	0,5	1,1	1,4	100
<i>Septoglossum constrictum</i> (Se.con)	7	3,6	1,3	9,4	9,8	12	3,9	0,4	0,2	8,6	0,6	1,3	100
<i>Fu. fragilistratus</i> (Fu.fra)	1,2	0,2	0,9	0,6	3,6	1,2		0,6	1,7	0,6	0,5		83,3
<i>Cl. etunicatum</i> (Cl.etu)	0,3	0,2	0,6	0,1	0,4	1,1	0,4		0,1	1,1			75
<i>Diversispora epigaea</i> (Di.epi)	0,4	0,3		0,2	0,6	0,2	0,5	0,1	0,3	0,6			75
<i>Ac. longula</i> (Ac.lon)	0,1	0,7	1,3			0,2	0,4	0,7	0,2	0,1			66,7
<i>Tricispora</i> sp. BE1 (Tri.BE1)	0,1	0,2	0,1				1,1	0,4	0,6		0,4	0,7	66,7
<i>Am. fennica</i> (Am.fen)	0,1		2,6	0,1	1			0,8	1,1			0,1	58,3
<i>Entrophospora infrequens</i> (En. inf)	0,1				0,1	0,1			0,1	0,3	0,1		50
<i>Ar. sp. CH5</i> (Ar. CH5)		0,2		0,5		0,3			0,7				33,3
Groupe B: espèces de champignons MA identifiées dans tous les systèmes agricoles – le plus fréquemment avec labour et rotation intensive													
<i>Fu. mosseae</i> (Fu. mos)	4,3	2,2	4,6	9,8	12,4	8,7	4,7	6,9	28,7	11,9	5,4	3,2	100
<i>Cl. claroideum</i> (Cl. cla)	1,3	2,8	1,9	2,1	1,8	6,7	2,1	3,6	15,3	3,6	2,7	3,9	100
Groupe C: espèces de champignons MA identifiées presque exclusivement dans les sols labourés													
<i>Fu. caledonius</i> (Fu. cal)			0,3	0,1		0,2	0,9	2	8,2		0,7	1	66,7
Groupe D: espèces de champignons MA identifiées, qui manquent notamment en cas d'exploitation intensive sans prairie temporaire dans la rotation													
<i>Cetranspora helvetica</i> (Ce. hel)	4,1	1	1,8	2,1	0,3	0,3	1,7	3,4		0,7	2	1,1	91,7
<i>Do. aurea</i> (Do. aur)	3,2	2,2	4,7	1,4	4	2	3,1	3,2		0,6	3,8	2,2	91,7
<i>Do. compressa</i> (Do. com)	14,4	2,8	0,6	0,7	4,4	1,5	3,1	1,2		0,7	0,9	0,6	91,7
<i>Glomus badium</i> (Gl. bad)	1,5	1,1	0,8	1,4	0,8	0,3	2,9	0,6		0,8	0,6		83,3
<i>Gl. macrocarpum</i> (Gl. mac)	2,3	3,1	1,3	0,4	1	0,7	0,3	0,1		0,2		0,2	83,3
<i>Ac. sieverdingii</i> (Ac. sie)	0,2	2,8	6,1		0,2		0,6	0,9		0,4	1	4,3	75
<i>Rh. microaggregatum</i> (Rh. mic)	0,4	2,6		0,7	1,1	0,9	0,4	2		0,8		2	75
<i>Ac. laevis</i> (Ac. lae)		1,3	11,2	0,4		0,2	0,1	0,1			3,1	1,2	66,7
<i>Ce. armeniaca</i> (Ce. arm)	1,9	0,7	2,4	1,4		0,2	1,2	2,7				3	66,7
<i>Di. celata</i> (Di. cel)	1,6	0,4	0,6		0,6	0,7	0,4			0,6			58,3
<i>Ac. cavernata</i> (Ac. cav)	0,1	1,8	0,2		0,1		0,3				0,1		50
<i>Gl. microcarpum</i> (Gl. mic)	0,1	0,2	0,4	0,4			0,9				0,2		50
<i>Ce. pellucida</i> (Ce. pel)		0,2		0,1		0,1				0,1	0,4		41,7
<i>Am. gerdemannii</i> (Am. ger)		0,4				0,2					0,6		25
<i>Pacispora dominikii</i> (Pa. dom)			0,1			3,2					4,6		25
<i>Pa. laccatum</i> (Pa. lac)	0,2	0,3								0,6			25
Groupe E: espèces de champignons MA identifiées essentiellement dans les prairies permanentes													
<i>Gigaspora margarita</i> (Gi. mar)	0,8	0,6	0,6									0,2	33,3
<i>Sc. arenicola</i> (Sc. are)	0,1	0,6	0,1	0,2									33,3
Groupe F: espèces de champignons MA rarement identifiées en général													
<i>Ac. thomii</i> (Ac. tho)		0,5	1,7										16,7
<i>Ar. myriocarpa</i> (Ar. myr)						0,1				0,5			16,7
<i>Cl. lamellosum</i> (Cl. lam)		0,1										0,1	16,7
<i>Fu. monosporus</i> (Fu. mon)						0,1			0,7				16,7
<i>Rh. clarum</i> (Rh. cla)			0,2					0,1					16,7
<i>Simiglossum hoi</i> (Si. hoi)		0,2						0,3					16,7
<i>Racocetra castanea</i> (Ra. cas)	0,1												8,3
<i>Am. sp. SL1</i> (Am. SL1)		0,1											8,3
<i>Pa. franciscana</i> (Pa. fra)				1,1									8,3
<i>Gl. hyderabadensis</i> (Gl. hyd)					0,4								8,3
<i>Pa. lacteum</i> (Pa. lact)						0,1							8,3
<i>Fu. caesaris</i> (Fu. cae)										0,1			8,3

¹66,7–100% = (presque) partout; 33,4–66,6% = très fréquentes; 20–33,3% = fréquentes; < 20% = rares.

d'espèces par site (tabl. 2) était le plus élevé et pour le site de l'OBA qu'il était le plus faible (PER; abréviation voir tabl. 1). C'était aussi le site qui affichait la plus forte intensité de production; les autres sites ne présentaient pas de répartition claire. L'expérience a montré que le nombre d'espèces dans les prairies permanentes est plus élevé que dans les sols cultivés, plus élevé également avec le semis direct qu'avec le labour (Kabir 2005, Wetzel *et al.* 2014, Maurer *et al.* 2014); sachant que la culture au moment de l'échantillonnage pourrait également avoir eu une influence.

La densité des spores et le nombre d'espèces trouvées sont combinés pour décrire la diversité (tabl. 2): alors qu'avec l'indice de diversité de Margalef, les prairies permanentes apparaissaient comme abritant une communauté de champignons MA plus diversifiée que les terres cultivées, les différences étaient minimales avec l'indice Shannon Weaver; ceci indique que les communautés fongiques sont équilibrées sur tous les sites. Seule la parcelle OBA (PER) qui était cultivée le plus intensivement et ne comportait pas de prairies temporaires affichait la diversité la plus basse avec les deux indices. En général, le nombre d'espèces, la densité des spores et les indices de tous les sites bernois sont très élevés par rapport aux études réalisées en Europe centrale (Oehl et Koch 2018). Cette différence pourrait s'expliquer par les intensités de production plutôt faibles des prairies permanentes et des terres cultivées selon les directives PER en Suisse.

Fréquences et espèces caractéristiques

La liste des espèces présentées dans le tableau 3 montre que sur un total de 57 espèces de champignons MA, 33 ont été trouvées (presque) partout (66,7–100%), six espèces ont été trouvées très fréquemment (33,3–66,6%), six fréquemment (20–33,3%) et douze espèces seulement sur un ou deux sites (<20%, groupe F). Vingt-quatre espèces n'ont montré aucune préférence pour un système agricole (groupe A). Il en va de même pour les deux espèces *Funneliformis mosseae* et *Claroideoglossum claroideum*, qui sont cependant les plus fréquentes dans les champs régulièrement labourés et dans une rotation intensive (groupe B). L'espèce *Fu. caledonius* a été trouvée presque exclusivement dans des sols labourés (groupe C) et est considérée comme leur espèce caractéristique (Maurer *et al.* 2014). Au total, 16 espèces de champignons MA étaient absentes du site de l'OBA (PER) où l'intensité de production était la plus élevée (groupe D). *Gigaspora margarita* et *Scutellospora arenicola* ont été trouvées principalement dans des prairies permanentes (groupe E).

Comme on pouvait s'y attendre, l'analyse multivariante a séparé les communautés de spores des deux types d'utilisation du sol «prairie permanente» et «terres cultivées» l'une de l'autre (fig. 2). Les prairies permanentes ont été regroupées autour du paramètre pédologique «carbone organique (C_{org})». Le site le plus intensif OBA (PER) sans prairies temporaires s'est surtout profilé par rapport au vecteur «intensité de production», tandis que les surfaces de semis direct ainsi que la parcelle BIO HIN où le travail du sol était réduit se sont regroupées autour

Tableau 4 | Espèces indicatives MA, calculées comme valeur indicative selon Dufrêne et Legendre (1997) avec pertinence statistique correspondante. Voir le tableau 1 pour les abréviations.

	Valeur indicative	Valeur p
Prairie permanente		
<i>Gigaspora margarita</i>	92,1	0,0001****
<i>Glomus macrocarpum</i>	70,7	0,0001****
<i>Acaulospora thomii</i>	58,3	0,0001****
<i>Ac. cavernata</i>	47,2	0,0025***
<i>Ac. paulinae</i>	46,8	0,0030***
<i>Dominikia compressa</i>	57,5	0,0030***
<i>Diversispora celata</i>	41,1	0,0049***
<i>Ambispora sp. GE3</i>	43,0	0,0071***
<i>Ac. longula</i>	41,3	0,0097***
<i>Ac. sieverdingii</i>	45,7	0,0116**
<i>Scutellospora arenicola</i>	25,0	0,0374**
<i>Cetraspora armeniaca</i>	34,4	0,0502*
<i>Ce. helvetica</i>	37,0	0,0640*
Parcelle semis direct		
<i>Septoglossum constrictum</i>	53,7	0,0001****
<i>Funneliformis fragillistratus</i>	45,8	0,0040***
<i>Dominikia bernensis</i>	36,6	0,0155**
<i>Glomus hyderabadense</i>	25,0	0,0490**
Parcelle PER		
<i>Funneliformis caledonius</i>	82,1	0,0001****
<i>Claroideoglossum claroideum</i>	43,8	0,0079***
<i>Tricispora sp. BE1</i>	45,0	0,0038***
<i>Oehlia diaphana</i>	39,3	0,0169**
<i>Fu. mosseae</i>	39,5	0,0243**
<i>Paraglossum occultum</i>	34,2	0,0231**
<i>Rhizoglossum fasciculatum</i>	38,5	0,0867*
<i>Rh. irregulare</i>	31,5	0,0817*
Parcelle BIO		
<i>Claroideoglossum luteum</i>	41,2	0,0043***
<i>Funneliformis geosporus</i>	39,6	0,0087***
<i>Archaeospora trappei</i>	43,6	0,0091***
<i>Rhizoglossum invemaium</i>	33,5	0,0889*

Niveau de pertinence statistique * p < 0,1 ** p < 0,05 *** p < 0,01 **** p < 0,001

du «pH» et du «phosphore (P-NaAc, P-DL, P-Citrate)» ainsi qu'entre les vecteurs «intensité de production» et «C_{org}». Les surfaces BIO labourées normalement se sont regroupées à proximité des parcelles PER labourées avec prairies temporaires (NIE & GRA, tabl. 1). Les espèces indicatrices relevées étaient *Gi. margarita*, *Glomus macrocarpum* et *Acaulospora thomii* (toutes trois avec une pertinence statistique très élevée: $p < 0,001$) ainsi que *Ac. cavernata*, *Ac. paulinae*, *Ac. longula*, *Dominikia compressa*, *Diversispora celata* et *Ambispora sp. GE3* (toutes les six avec une pertinence statistique élevée: $p < 0,01$) dans les prairies permanentes; *Septoglomus constrictum* ($p < 0,001$) ou *Fu. fragilistratus* ($p < 0,01$) dans les surfaces de semis direct; *Cl. luteum*, *Fu. geosporus* et *Archaeospora trappei* (toutes trois : $p < 0,01$) dans les parcelles BIO et enfin *Fu. caledonius* ou *Cl. claroideum* et *Tricispora sp. BE1* (toutes les trois : $p < 0,01$) dans les parcelles PER (tabl. 4).

Conclusions

Avec 40–45 espèces dans les prairies permanentes et 28–40 dans les terres cultivées, les sols des douze sites KABO bernois étudiés présentaient un nombre très éle-

vé d'espèces de champignons MA par rapport aux autres régions cultivées d'Europe centrale (Oehl et Koch 2018). L'intensité de production plutôt faible des prairies permanentes et des terres cultivées, la forte proportion de surfaces de semis direct depuis de nombreuses années et l'utilisation généralement assez extensive du labour pourraient en être la cause. En effet, moins l'exploitation est intensive, plus la richesse des espèces et la diversité des champignons MA sont importantes. La présente étude a également confirmé la présence de certaines espèces ubiquistes (*Ar. trappei*, *Cl. claroideum*, *Rhizoglossum irregulare* ou *Oehlia diaphana*), ainsi que d'espèces indicatrices des parcelles labourées (*Fu. caledonius*), de parcelles à travail du sol réduit, semis direct compris (*Se. constrictum*) ou de prairies permanentes (*Gi. margarita*, *Gl. macrocarpum* ou *Ac. thomii*). Le type d'utilisation des terres (prairie permanente ou parcelle cultivée) et l'intensité de production se reflètent dans les communautés de champignons MA. Une agriculture durable et respectueuse des ressources peut promouvoir les champignons MA, qui améliorent l'approvisionnement en eau et en éléments nutritifs des plantes et leur permettent de mieux se protéger contre les agents pathogènes et les ravageurs. ■

Bibliographie

- Błaszowski J., Kozłowska A., Niezgoda P., Goto B. T. & Dalpé Y., 2018. A new genus, *Oehlia* with *Oehlia diaphana* comb. nov. and an emended description of *Rhizoglossum vesiculiferum*. *Nova Hedwigia* **107**, 501–518.
- Dufréne M. & Legendre P., 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* **67**, 345–366.
- Eidgenössische Forschungsanstalten ART und ACW, 1996. Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope. Band 2: Bodenuntersuchungen zur Standort-Charakterisierung.
- Jansa J., Erb A., Oberholzer H. R., Smilauer 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.
- Kabir Z., 2005. Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. *Revue Canadienne de Phytotechnie* **85**, 23–29.
- Maurer C., Rüdiger M., Chervet A., Stürny W. G., Flisch R. & Oehl F., 2014. Diversité des champignons mycorrhiziens arbusculaires sous semis direct et sous labour. *Recherche Agronomique Suisse* **5**, 398–405.
- Neyroud J. A. & Lischer P., 2003. Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **166**, 422–431.
- Oehl F., Jansa J., Ineichen K., Mäder P. & van der Heijden M., 2011a. Champignons mycorrhiziens arbusculaires, bioindicateurs dans les sols agricoles suisses. *Recherche Agronomique Suisse* **2**, 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., Oberholzer H. R., van der Heijden M., Laczko E., Jansa J. & Egli S., 2016. Champignons mycorrhiziens arbusculaires: bio-indicateurs dans les sols agricoles. *Recherche Agronomique Suisse* **7**, 48–55.
- Oehl F. & Koch B., 2018. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in no-till and conventionally tilled vineyards. *Journal of Applied Botany and Food Quality* **91**, 56–60.
- Rillig M. C., Aguilar-Triguerras C. A., Bergmann J., Verbruggen E., Veresoglou S. D. & Lehmann A., 2015. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation. *New Phytologist* **205**, 1385–1388.
- 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.
- VOL, 2017. Bodenbericht 2017. Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 130 p.
- Wetzel K., Silva G. A., Matczinski U., Oehl F. & Fester T., 2014. Superior differentiation of arbuscular mycorrhizal fungi communities from till and no-till plots by morphological spore identification when compared to T-RFLP. *Soil Biology & Biochemistry* **72**, 88–96.

Riassunto**I sistemi di coltivazione incidono sulla biodiversità delle micorrize**

La biodiversità dei funghi micorrizici arbuscolari (funghi MA) è stata studiata nel Cantone di Berna in 12 siti selezionati per l'osservazione dei suoli sul lungo periodo. Si tratta di tre campi arati gestiti secondo i metodi dell'agricoltura biologica e nove superfici in cui la produzione adempie i principi della prova che le esigenze ecologiche sono rispettate (PER): tre prati naturali, tre campi seminati su sodo e tre campi arati prima della semina. Le spore dei funghi MA sono state isolate e determinate morfologicamente in campioni di terreno prelevati dai primi 20 cm di suolo. Nei prati naturali sono state riscontrate 40–45 specie delle 57 identificate in totale, i campi seminati su sodo secondo la PER ne contenevano 33–40, i campi arati gestiti secondo i metodi dell'agricoltura biologica 31–35 e i campi arati prima della semina 28–35. In generale, i prati naturali erano caratterizzati da una densità di spore superiore a quella rilevata nelle superfici coltivate. Per ogni sistema di coltivazione sono state identificate specie caratteristiche. Una lavorazione rispettosa del suolo e un avvicendamento delle colture con una quota di prati temporanei e intervalli non troppo ravvicinati hanno favorito le comunità di micorrize nei terreni agricoli dell'Altopiano bernese. Qui le specie di funghi MA sono risultate nettamente più numerose che in altre regioni coltivate dell'Europa centrale con caratteristiche simili.

Summary**Cropping systems affect species diversity of mycorrhizal fungi**

Arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi) diversity was investigated in 12 selected long-term soil observation sites in the canton of Bern. These consisted of nine soils farmed according to Proof of Ecological Performance (PEP) production guidelines, of which three were natural meadows, three were no-till (NT) or ploughed (PL) arable soils, and three were ploughed arable soils farmed according to organic farming guidelines (ORG). The AM fungal spores from soil samples taken from the top 20 cm were isolated and morphologically determined. Of the total 57 detected species, 40–45 were found in natural meadows, 33–40 in PEP-NT soils, 31–35 in ORG-PL and 28–35 species in PEP-PL soils. Generally speaking, the meadows exhibited higher spore densities than the croplands. Indicator species were identified for each cropping system. Conservation tillage and wide crop rotations with a temporary-grassland component encouraged the AM fungal communities in the agricultural soils of the Bernese Midlands. The numbers of AM fungal species in these soils of the Bernese Midlands are higher than those previously reported from similar arable regions in central Europe.

Key words: arbuscular mycorrhizal diversity, grassland, no-tillage, plough, organic farming, Swiss Proof of Ecological Performance.