

Fertilité du sol et biodiversité en agriculture biologique

Paul Maeder,^{1*} Andreas Fliessbach,¹ David Dubois,² Lucie Gunst,² Padruot Fried,² Urs Niggli.¹

La compréhension des agroécosystèmes est une clef pour déterminer des systèmes d'agriculture efficaces. Nous présentons ici les résultats d'une étude de 21 ans, portant sur la performance agronomique et écologique de systèmes agricoles bio-dynamique, biologique et conventionnel dans le Centre de l'Europe. Nous avons constaté des rendements de culture inférieurs de 20% dans les systèmes organiques, bien que les intrants en engrais et en énergie fussent réduits de 34 à 53% et l'utilisation de pesticide de 97%. L'amélioration de la fertilité du sol et la plus grande biodiversité constatées dans les terrains biologiques peuvent rendre ces systèmes moins dépendants d'apports extérieurs.

¹Institut de Recherche sur l'Agriculture Biologique, Ackerstrasse, CH-5070 Frick, Suisse.

² Station de Recherche Fédérale pour l'Agroécologie et l'Agriculture, Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zurich, Suisse.

* Personne à qui la correspondance doit être adressée. Courriel: paul.maeder@fibl.ch

L'agriculture intensive a augmenté les rendements de culture, mais elle a aussi posé de graves problèmes environnementaux (1). Dans l'idéal, l'agriculture durable produirait de bons rendements culturaux avec un impact minimum sur les facteurs écologiques tels que la fertilité du sol (2,3). Un sol fertile fournit les nutriments essentiels pour la croissance des plantes cultivées, soutient une communauté biotique diverse et active, montre une structuration typique du sol et permet une décomposition non perturbée.

Les systèmes d'agriculture biologique sont une alternative à l'agriculture conventionnelle. Dans certains pays européens, jusqu'à 8% de la surface cultivée est gérée de façon biologique selon le règlement de l'Union Européenne (EEE) N° 2092/91 (4). Mais quelle est réellement la viabilité de cette méthode de production? Le nombre restreint d'essais à long terme montre des avantages pour l'environnement (5,6). Nous présentons ici les résultats d'une comparaison d'essais "DOK" sur une durée de 21 ans (bio-dynamique, biologique, et "conventionnel"), qui est basée sur un assolement de ley (*ley rotation*). Le champ d'expérimentation fut mis en place en 1978, sur un sol de loess à Therwill, Suisse [(7) et le matériel à l'appui en ligne, voir à la fin des notes]. Deux systèmes d'agriculture biologique (bio-dynamique, BIODYN; biologique, BIOORG) et deux systèmes conventionnels (utilisant des engrais minéraux et du fumier de cour de ferme: CONFYM; n'utilisant exclusivement que des engrais minéraux: CONMIN) sont émuloés dans une expérimentation répliquée en plein champ (tableau S1 et Fig. S1).

Les deux systèmes conventionnels furent modifiés vers l'agriculture intégrée en 1985. L'assolement cultural, les variétés et la préparation du sol furent identiques dans tous les systèmes étudiés (Tableau S2).

Dans les systèmes biologiques, nous avons découvert un apport en éléments nutritifs (N, P, K,) inférieur de 34 à 51% à ceux des systèmes conventionnels, alors que le rendement cultural n'était que de 20% inférieur sur une période de 21 ans. (Fig. 1, Tableau 1), indiquant une production efficace. Dans les systèmes biologiques, l'énergie nécessaire à la production d'une unité de matière culturale sèche était de 20 à 56% inférieure à celle du système conventionnel et, proportionnellement, de 36 à 53% inférieure par unité de surface cultivée (Tableau S4 et S5).

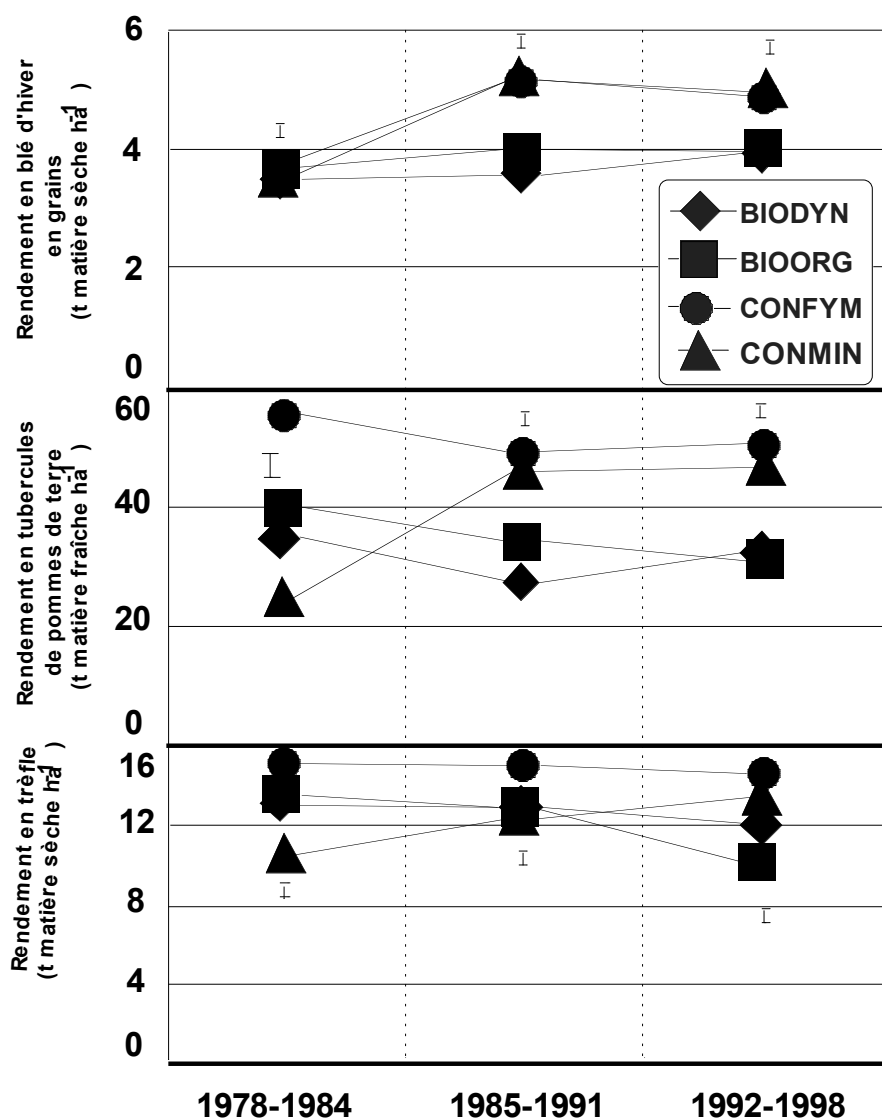


Fig. 1. Rendement de blé d'hiver, de pommes de terre et de trèfle dans les systèmes agricoles soumis au test DOK. Les valeurs sont les moyennes de six ans pour le blé d'hiver et le trèfle, et de trois ans pour les pommes de terre, par période d'assolement culturel. Les barres représentent les différences les moins significatives ($P < 0$).

Tableau 1. Apport de nutriments, de pesticides et d'énergie fossile aux systèmes soumis à l'essai DOK. L'apport d'éléments nutritifs est la moyenne de 1978-1998 pour BIODYN, BIOORG, et CONFYM et de 1985-1998 pour CONMIN. L'azote soluble est la somme de $\text{NH}_4\text{-N}$ et de $\text{NO}_3\text{-N}$. L'apport d'éléments actifs dans les pesticides a été calculé sur la période 1985-1991. L'énergie, pour la production de la machinerie et l'infrastructure, en combustible et a été calculée pour la production d'engrais minéral et les pesticides sur la période 1985-1991.

Système agricole	Azote total ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)	Azote soluble ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)	Phosphore ($\text{kg P ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)	Potassium ($\text{kg K ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)	Pesticides ($\text{kg ingrédients actifs ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)	Énergie ($\text{GJ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)
BIODYN	99	34	24	158	0	12.8
BIOORG	93	31	28	131	0.21	13.3
CONFYM	149	96	43	268	6	20.9
CONMIN	125	125	42	253	6	24.1

Les rendements de pommes de terre dans les systèmes biologiques atteignent 58 à 66% de ceux des terrains gérés en agriculture conventionnelle (Fig. 1), principalement dus à l'apport de potassium et à l'incidence de *Phytophthora infestans*. Les rendements de blé d'hiver dans les trois périodes d'assolement cultural ont atteint une moyenne de 4,1 tonnes par hectare dans les systèmes biologiques. Cela correspond à 90% du grain récolté dans les systèmes conventionnels, ce qui est similaire aux rendements des fermes conventionnelles de la région (8). Les différences pour le trèfle furent légères.

Les rendements céréaliers sous culture biologique en Europe sont typiquement de 60 à 70% de ceux sous culture conventionnelle, tandis que les rendements des prairies se situent dans une fourchette allant de 70 à 100%. Les bénéfices des fermes biologiques en Europe sont similaires à ceux des fermes conventionnelles comparables (9). Une sélection végétale appropriée peut améliorer les rendements céréaliers en agriculture biologique. Il y a des différences mineures entre les systèmes agricoles dans la qualité alimentaire (10).

L'entretien de la fertilité du sol est important pour l'utilisation durable du terrain. Dans nos champs expérimentaux, les sols cultivés en biologie montrent une plus grande activité biologique que les sols cultivés de façon conventionnelle. Par contre, les paramètres chimiques et physiques du sol montrent moins de différences (Fig. 2).

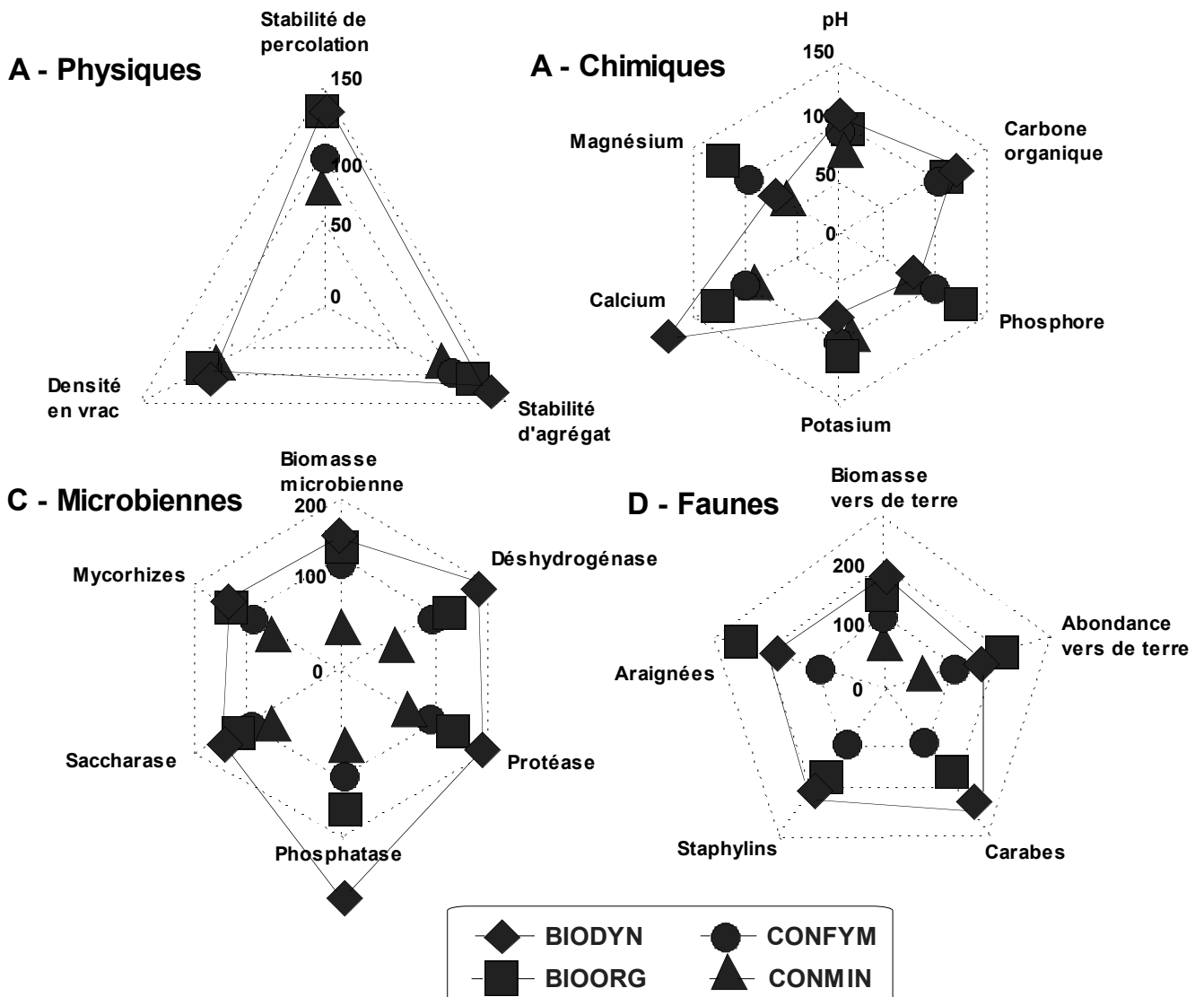


Fig. 2. Propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols des systèmes agricoles soumis à l'essai DOK. Les analyses ont été effectuées dans la zone labourée du sol (0 à 20 cm), excepté pour la faune du sol. Les résultats sont présentés relativement à CONFYM (= 100%) dans quatre graphiques radars. Les valeurs absolues pour 100% sont les suivantes. **(A)** Stabilité à la percolation, 43.3 ml min⁻¹; stabilité d'agrégat, 55% d'agrégats stables > 250µm; densité en vrac, 1.23 g cm⁻³. **(B)** pH(H₂O), 6.0; carbone organique, 15.8 g C_{org} kg⁻¹; phosphore, 21.4 mg P kg⁻¹; potassium, 97.5 mg K kg⁻¹; calcium, 1.7 g Ca kg⁻¹; magnésium, 125 mg Mg kg⁻¹. **(C)** Biomasse microbienne, 285 mg C_{mic} kg⁻¹; activité de déshydrogénase, 133 mg TPF kg⁻¹ h⁻¹; activité de protéase, 238 mg Tyr kg⁻¹ h⁻¹; phosphatase alcaline, 33 mg phénol kg⁻¹ h⁻¹; saccharase, 526 mg de sucre réduit kg⁻¹ h⁻¹; mycorhize, 13.4% de longueur de racine colonisées par les champignons. **(D)** Biomasse en vers de terre, 183 g m⁻²; abondance des vers de terre, 247 individus m⁻²; carabes, 55 individus; staphylins, 23 individus; araignées, 33 individus. Les arthropodes n'ont pas été déterminés dans le système CONMIN en raison du plan d'essai en champ. Des effets significatifs ont été mis en évidence pour tous les paramètres exceptés pour la densité en vrac, C_{org}, et le potassium (analyse de la variance; $P < 0.05$). Pour les méthodes, voir le tableau S3.

La stabilité d'agrégat du sol, telle qu'elle a été évaluée par la méthode de percolation **(11)** et la méthode du tamis humide **(12)**, est de 10 à 60% plus élevée dans les terrains biologiques que dans ceux cultivés de façon conventionnelle. (Fig. 2A). Ces différences reflètent la situation telle qu'elle est observée dans le champ (Fig. 3, A & B), où les champs biologiques présentent une plus grande stabilité du sol. Nous avons trouvé une corrélation positive entre la stabilité d'agrégat et la biomasse microbienne ($r = 0.68$, $P < 0.05$), et entre la stabilité d'agrégat et la biomasse en vers de terre ($r = 0.45$, $P < 0.05$).

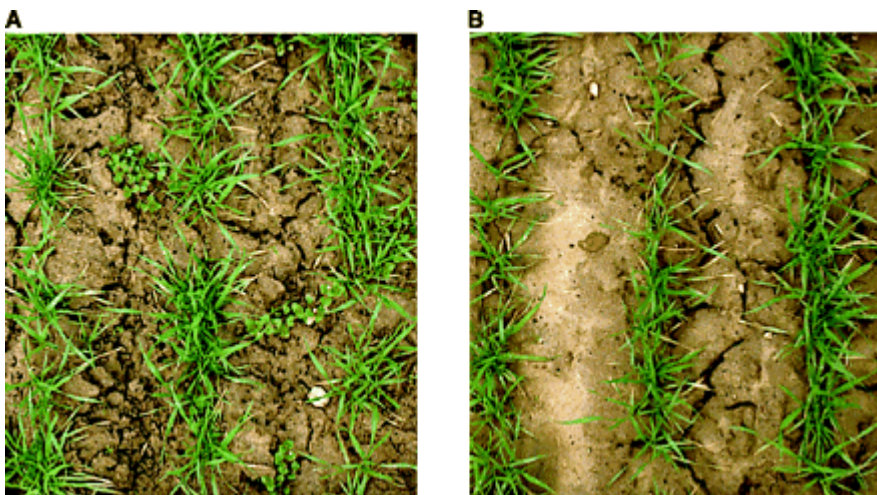


Fig. 3 Surface des sols bio-dynamique **(A)** et conventionnel **(B)** dans les champs de blé d'hiver. Les déjections de vers de terre et les pousses de mauvaise herbe sont plus fréquentes dans le terrain bio-dynamique. La désagrégation des particules du sol dans les terrains conventionnels mène à une surface plus lissée. L'écartement des rangs de blé est de 0.167 m. Source: T. Alföldi, Institut de Recherche d'agriculture biologique [Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL)].

Le pH du sol est légèrement plus élevé dans les systèmes biologiques (Fig. 2B). Les fractions solubles de phosphore et de potassium sont inférieures dans les sols biologiques à celles des sols conventionnels, alors que le calcium et le magnésium sont plus élevés. Cependant, le flux de phosphore entre la matrice et la solution du sol est le plus élevé dans le système BIODYN **(13)**. Les microorganismes du sol gouvernent les innombrables réactions de recyclage des nutriments dans les sols. La biomasse microbienne augmente dans l'ordre suivant: CONMIN < CONFYM < BIOORG < BIODYN (Fig. 2C). Dans les sols des systèmes biologiques, les activités de déshydrogénase, protéase et phosphatase sont plus élevées que dans les sols conventionnels, indiquant une plus grande activité microbienne globale et une capacité plus élevée à cliver les protéines et le phosphore organique **(12)**. Le flux de phosphore au travers de la biomasse microbienne est plus rapide dans les sols biologiques, et plus de phosphore est lié au sein de la biomasse microbienne **(14, 15)**. Apparemment, les éléments nutritifs dans les sols biologiques sont moins dissous dans la solution du sol, et les processus microbiens de transformation peuvent contribuer à l'apport de phosphore aux plantes.

Les mycorhizes, en tant que membres de la communauté du sol, améliorent la nutrition minérale de la plante et contribuent à la formation d'agrégat (16). La longueur de racine colonisée par les mycorhizes dans l'agriculture biologique est 40 % plus élevée que dans les systèmes conventionnels (7) (Fig. 2C).

La biomasse et l'abondance des vers de terre sont plus importantes d'un facteur 1.3 à 3.2 dans les terrains organiques, comparées aux conventionnels (17) (Fig. 2D). Nous avons aussi recherché les arthropodes épigés qui vivent près du sol, parce que ce sont d'importants prédateurs et ils sont considérés comme des indicateurs sensibles de la fertilité du sol. L'activité moyenne de la densité de carabes, staphylinés et araignées dans les terrains organiques était presque double de celle des terrains conventionnels (18) (Fig. 2D).

Les écosystèmes sains sont caractérisés par une grande diversité d'espèces. L'essai DOK montre que l'agriculture biologique permet le développement d'une flore de mauvaises herbes relativement variées. Neuf des 11 espèces sont rencontrées dans les champs de blé cultivés en biologie et une espèce dans les terrains conventionnels. Entre 28 et 34 espèces de carabes sont rencontrées dans le système BIODYN, 26 à 29 espèces dans le BIOORG, et 22 à 26 espèces dans le système CONFYM (18). Quelques espèces spécialisées et menacées ne sont présentes que dans les deux systèmes organiques. En dehors de la présence et de la diversité des mauvaises herbes, des effets directs des pesticides et la densité des plants de blé influencent le plus probablement l'activité et la diversité des arthropodes.

L'une des découvertes particulièrement remarquables, présentée dans la Fig. 4, est le fort accroissement significatif de la diversité microbienne (BIOLOG Inc., Hayward, CA) dans l'ordre CONMIN, CONFYM < BIOORG < BIODYN, et une diminution associée dans le quotient métabolique (qCO_2) (19). Selon la théorie de Odum, sur la stratégie développementale d'écosystème, le rapport de la respiration totale à la biomasse totale décroît durant la succession au sein d'un écosystème (20). Ce quotient a été adapté aux organismes du sol (21), où l'évolution du CO_2 est un processus biologique principalement gouverné par les microorganismes. Le qCO_2 plus bas dans les systèmes biologiques, particulièrement dans le système BIODYN, indique que ces communautés sont capables d'utiliser les substances organiques plus pour la croissance que l'entretien.

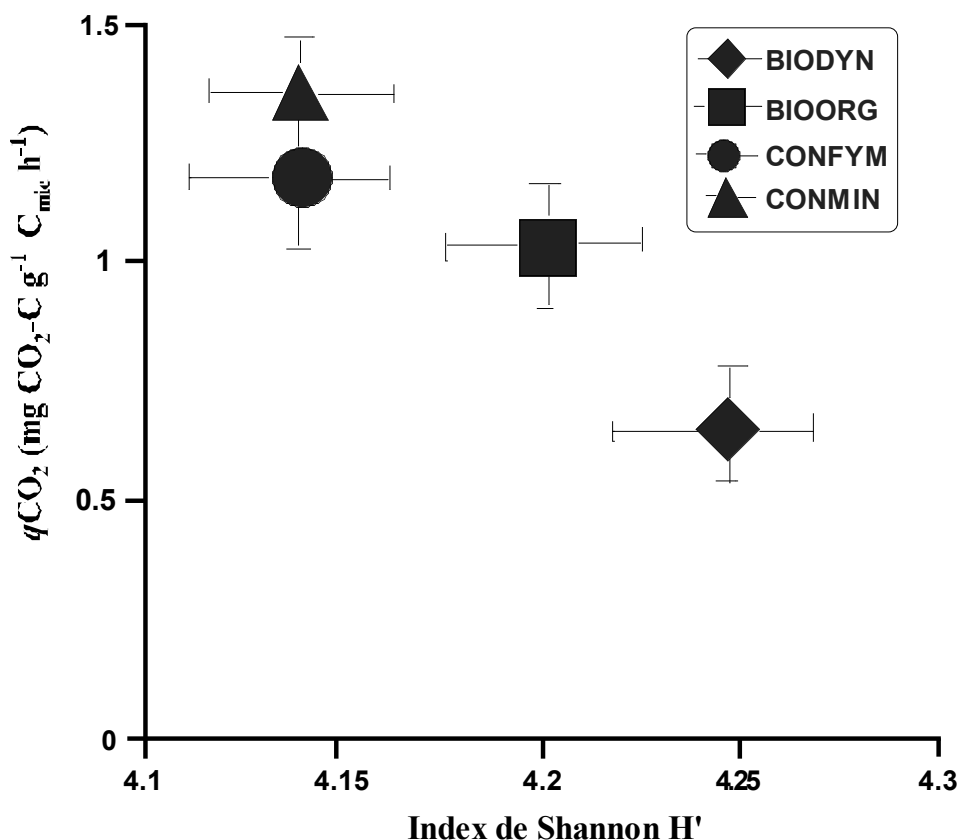


Fig. 4. La diversité fonctionnelle microbienne du sol (index Shannon H') et le quotient métabolique (qCO_2 = respiration basale du sol / biomasse microbienne du sol) sont inversement corrélés. Une plus grande diversité dans les terrains biologiques est en relation avec un plus faible qCO_2 , indiquant une plus grande efficacité

énergétique d'une communauté microbienne plus diversifiée. L'index de Shannon est significativement différent entre les deux systèmes conventionnels (CONFYM, CONMIN) et le système BIODYN, le qCO_2 entre le CONMIN et le BIODYN ($P < 0.05$).

Dans des conditions contrôlées, la communauté microbienne diversifiée du sol BIODYN décompose plus de matériel végétal marqué au ^{14}C que celles des sols conventionnels (22). Dans le champ, la fraction légère des particules de matière organique, signalant du matériel végétal non décomposé, se décompose plus complètement dans les systèmes biologiques (23). Par conséquent, des communautés microbiennes avec une diversité croissante dans les sols biologiques transforment le carbone des débris organiques en biomasse à un coût énergétique plus bas, édifiant une biomasse microbienne plus forte. En conséquence, le rôle fonctionnel des diverses communautés végétales dans l'utilisation du nitrate du sol a été cité (24), aussi bien que l'importance de la diversité des mycorhizes pour la consommation de phosphore et la productivité végétale (25). Les résultats cohérents de ces deux études (24, 25) et la nôtre, au sein du système sol-plante, sont en faveur de l'hypothèse qu'une communauté plus diverse est plus efficace dans l'utilisation des ressources. L'amélioration de l'activité biologique et de la biodiversité au-dessous et au-dessus du sol dans les étapes initiales des réseaux nutritifs dans l'essai DOK, fournit probablement une contribution positive vers le développement d'un réseau nutritif supérieur incluant les oiseaux et des animaux plus grands.

Les systèmes biologiques montrent une utilisation des ressources efficace et stimulent la diversité florale et faunique, caractéristiques typiques de systèmes parvenus à maturité. Il y a une corrélation significative ($r = 0.52$, $P < 0.05$) entre l'efficacité du système au-dessus du sol (unité d'énergie par unité de rendement cultural) et celui au-dessous du sol (évolution du CO_2 par unité de biomasse microbienne du sol) dans l'essai DOK. Nous en concluons que les assolements de plantes cultivées biologiquement, à base de légumineuse et utilisant les engrais organiques de la ferme elle-même, représentent une alternative réaliste aux systèmes agricoles conventionnels.

Références et notes

1. D. Pimentel, *et al.*, *Science* **267**, 117 (1995).
2. D. Tilman, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* **96**, 5995 (1999).
3. D. Pimentel *et al.*, *Bioscience* **47**, 747 (1997).
4. www.organic.aber.ac.uk/stats.shtml
5. L. E. Drinkwater, P. Wagoner, M. Sarrantonio, *Nature* **396**, 262 (1998).
6. J. P. Reganold, J. D. Glover, P. K. Andrews, H. R. Hinman, *Nature* **410**, 926 (2001).
7. P. Mäder, S. Edenhofer, T. Boller, A. Wiemken, U. Niggli, *Biol. Fertil. Soils* **31**, 150 (2000).
8. P. Simon, Landwirtschaftliches Zentrum Ebenrain, CH-4450 Sissach/BL, communication personnelle.
9. F. Offermann, H. Nieberg, *Economic Performance of Organic farms in Europe* (Université de Honnenheim, Hago Druck & Medien, Karlsbad-Ittersbach, Allemagne, 2000), Vol. 5.
10. T. Aföldi *et al.*, résultats non publiés.
11. S. Siegrist, D. Schaub, L. Pfiffner, P. Mäder, *Agric. Ecosys. Environ.* **69**, 253 (1998).
12. F. Schinner, R. Ohlinger, E. Kandeler, R. Pargesin, *Bodenbiologische Arbeitsmethoden* (Springer Verlag, Berlin Heidelberg, ed. 2, 1993).
13. A. Oberson, J.-C. Fardeau, J.-M. Besson, H. Sticher, *Biol. Fertil. Soils* **16**, 111 (1993).
14. A. Oberson, J.-M. Besson, N. Maire, H. Sticher, *Biol. Fertil. Soils* **21**, 138 (1996).
15. F. Oehl, *et al.*, *Biol. Fertil. Soils* **34**, 31 (2001).
16. S. E. Smith, D. J. Read, *Mycorrhizal Symbiosis* 'Academic Press, London, et. 2, 1997).
17. L. Pfiffner & P. Mäder, *Biol. Agric. Hortic.* **15**, 3 (1997).
18. L. Pfiffner & U. Niggli, *Biol. Agric. Hortic.* **12**, 353 (1996).
19. A. Fließbach, P. Mäder, dans *Microbial Communities - Fonctionnal versus Structural Approaches*, H. Insam, A. Rangger, Eds (Springer, Berlin, 1997), pp. 109-120.
20. E. P. Odum, *Science* **164**, 262 (1969).
21. H. Insam & K. Haselwandter, *Oecologia*, **79**, 174 (1989).
22. A. Fließbach, P. Mäder & U. Niggli, *Soil Biol. Biochem.* **32**, 1131 (2000).
23. A. Fließbach, P. Mäder, *Soil Biol. Biochem.* **32**, 757 (2000).
24. D. Tilman, D. Wedin, J. Knops, *Nature* **359**, 718 (1996).
25. M. G. A. van der Heijden, *et al.*, *Nature* **396**, 69 (1998).
26. Nous remercions sincèrement tous les collaborateurs impliqués dans l'essai DOK, tout particulièrement W. Stauffer et R. Frei et les groupes de fermiers. Nous remercions aussi T. Boller et A. Wiemken et deux

répondants inconnus pour leurs commentaires utiles. Ce travail a été soutenu par le Bureau Fédéral Suisse pour l'Agriculture et la Fondation Scientifique Nationale Suisse.

Pour Matériel et Méthodes et les Fig. S1 & Tableaux S1 à S5, voir: www.sciencemag.org/cgi/content/full/296/5573/1694/DC1

21 février 2002; accepté le 26 avril 2002

10.1126/science.1071148 - Inclure cette information lorsque l'on cite cette publication.

Science, Volume **296**, N° 5573, 31 mai 2002, p.1694

(Traduction française: *Daniel Kmićik, Dr. d'État en Biologie*)