

Méta-analyse sur l'impact des modes de production agricole sur la qualité écologique du sol

A. Christel^(1,2), P.-A. Maron⁽²⁾ et L. Ranjard^(2*)

1) AgroParisTech, 75732 Paris, France

2) Agroécologie, AgroSup Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

* Auteur correspondant : lionel.ranjard@inrae.fr

RÉSUMÉ

Le modèle d'agriculture productiviste, développé après la seconde guerre mondiale, a permis d'augmenter les rendements de façon à répondre à la demande alimentaire croissante mais il a aussi profondément affecté les propriétés physico-chimiques des sols et leur biodiversité. Pour réduire l'empreinte environnementale de l'agriculture conventionnelle et intensive, les acteurs du monde agricole ont développé des modes de production alternatifs comme l'agriculture biologique (AB), la biodynamie (ABD) ou l'agriculture de conservation (ACS) qui visent tous à améliorer la qualité physico-chimique et biologique des sols. Si de nombreuses publications et synthèses bibliographiques ont évalué l'impact des pratiques culturales sur la qualité biologique du sol, peu ont considéré l'évaluation systémique de l'impact des modes de production agricole. Ici, nous avons mené la première synthèse bibliographique internationale qui évalue l'impact de quatre modes de production sur la qualité écologique du sol grâce à des indicateurs ciblant les grands groupes d'organismes vivants. Cette étude montre tout d'abord que les modes de production conventionnel, AB et ABD sont les plus étudiés et comparés entre eux alors que l'ACS est peu étudié. Les tendances observées indiquent une amélioration d'environ 70 % des bioindicateurs biologiques en ABD et AB par rapport à l'agriculture conventionnelle. L'ABD montre une amélioration pour 43 % des bioindicateurs en comparaison avec l'AB. De son côté, l'ACS apparaît plus vertueux que l'agriculture conventionnelle pour 57 % des indicateurs mesurés. L'ABD représente

Comment citer cet article :

Christel A., Maron P.-A. et L. Ranjard L., 2022 - Méta-analyse sur l'impact des modes de production agricole sur la qualité écologique du sol - *Étude et Gestion des Sols*, 29, 117-144

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-29/>

Comment consulter/télécharger tous les articles de la revue EGS :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

donc le mode de production le plus vertueux, suivi de l'AB et l'ACS et enfin de l'agriculture conventionnelle, pour la qualité écologique du sol. L'analyse fine des pratiques culturales montre que la fertilisation organique et l'allongement de la rotation sont les pratiques les plus favorables alors que l'application des produits phyto-pharmaceutiques et le travail du sol sont les plus délétères. Cette synthèse permet aussi de pointer le manque d'études sur l'ACS ainsi que sur certains bioindicateurs de la faune du sol. Elle permet donc d'identifier les pistes de recherche pour l'identification des modes de production les plus vertueux et innovants et ainsi orienter les décisions politiques et le conseil agricole dans le sens de la transition agroécologique.

Mots-clés

Agroécologie, biodiversité, mode de production, pratique culturale

SUMMARY

IMPACT OF FARMING SYSTEMS ON SOIL ECOLOGICAL QUALITY: A meta analysis

Productivist model implemented after the second world war succeeded in improving production to meet growing demands for food, but it also deeply affected the soil physicochemical properties, as well as of above-ground and below-ground biodiversity. Alternative farming systems like organic farming, biodynamic farming and soil conservation farming are developing, all aiming at improving the soil ecological quality to enhance the sustainability of the farming system. Although numerous publications have evaluated the impact of agricultural practices on the soil ecological quality, to date no review has addressed the impact of the different farming systems as a whole. Here, we carried out the first bibliographical review on the impact of four international farming systems on soil biodiversity by focusing on the main groups of living organisms. By compiling and synthesizing about 100 scientific publications, we evidenced that the conventional, organic, and biodynamic systems are the most widely studied and compared ones, whereas soil conservation farming is poorly studied. Observed trends show that soil biological indicators are improved by ca. 70% in organic farming and biodynamic farming relative to conventional farming. Forty-three percent of the soil bioindicators are improved in biodynamic farming relatively to organic farming. Soil conservation farming scores better than conventional farming for 57% of the indicators. Therefore, biodynamic farming represents the highest soil ecological quality, followed by organic farming, soil conservation farming and, last, conventional farming. A detailed analysis indicates that organic fertilization and longer crop rotations are the most favourable practices, whereas pesticides and soil tillage are the most deleterious ones. The review also evidences a lack of studies on soil conservation farming and on bioindicators of the soil fauna. It points the strategic topics that further research should tackle to identify the best practices and farming systems to progress on the path of the agroecological transition.

Key-words

Agroecology, biodiversity, farming practice, farming system, indicator, soil

RESUMEN

META-ANÁLISIS SOBRE EL IMPACTO DE LOS MODOS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SOBRE LA CALIDAD ECOLÓGICA DEL SUELO

El modelo de agricultura productivista, desarrollado después de la segunda guerra mundial, permitió aumentar los rendimientos para contestar a la creciente demanda alimentaria, pero también afectó profundamente las propiedades fisicoquímicas de los suelos y su biodiversidad. Para reducir la huella medioambiental de la agricultura convencional e intensiva, los actores del mundo agrícola desarrollaron modos de producción alternativos como la agricultura orgánica (AB), la biodinámica (ABD) o la agricultura de conservación (ACS), todos ellos destinados a mejorar la calidad fisicoquímica y biológica de los suelos. Si muchas publicaciones y síntesis bibliográficas evaluaron el impacto de las prácticas de cultivo en la calidad biológica del suelo, pocas consideraron la evaluación sistémica de los efectos de los métodos de producción agrícola. Aquí realizamos la primera síntesis bibliográfica internacional que evalúa el impacto de cuatro modos de producción en la calidad ecológica del suelo a través de indicadores dirigidos a grandes grupos de organismos vivos. Este estudio muestra, en primer lugar, que los métodos de producción convencional, AB y ABD son los más estudiados y comparados entre sí, mientras que la ACS está poco estudiada. Las tendencias observadas indican una mejora de aproximadamente el 70% de los bioindicadores biológicos en ABD y AB en comparación con la agricultura convencional. La ABD muestra una mejoría del 43% en los bioindicadores en comparación con la AB. Por su parte, la ACS parece más virtuosa que la agricultura convencional en el 57% de los indicadores medidos. La ABD representa pues el modo de producción más virtuoso, seguido por la AB y la ACS y, por último, por la agricultura convencional, para la calidad ecológica del suelo. El cuidadoso análisis de las prácticas de cultivo muestra que la fertilización orgánica y el

alargamiento de la rotación son las prácticas más favorables, mientras que la aplicación de productos fitosanitarios y el trabajo del suelo son las más perjudiciales. Esta síntesis permite también señalar la falta de estudios sobre la ACS así como sobre algunos bioindicadores de la fauna del suelo. Por lo tanto, permite identificar las pistas de investigación para la identificación de los modos de producción más virtuosos e innovadores y así orientar las decisiones políticas y el asesoramiento agrícola en el sentido de la transición agroecológica.

Palabras clave

Agroecología, biodiversidad, modo de producción, práctica de cultivo

INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'un des principaux défis pour l'agriculture est d'assurer la sécurité alimentaire pour une population mondiale croissante tout en préservant la qualité environnementale. Le modèle productiviste, développé après la seconde guerre mondiale, a permis d'augmenter les rendements de façon à répondre à la demande alimentaire croissante mais il a aussi profondément affecté les propriétés physico-chimiques des sols et leur biodiversité (Giller *et al.*, 1998 ; Thiele-Bruhn *et al.*, 2012) en raison de l'utilisation massive des produits chimiques de synthèse et de l'intensité du travail du sol (Tsiafouli *et al.*, 2015). Depuis les années 60-70, une volonté accrue d'appliquer les concepts de l'écologie à l'agriculture a permis l'émergence de l'agroécologie comme nouveau cadre conceptuel et technique pour le développement d'une agriculture durable (Francis *et al.*, 2003 ; Hazell et Wood, 2008). Il s'agit notamment de limiter l'utilisation des intrants et de s'appuyer sur les fonctionnalités des écosystèmes qui découlent pour grande partie de leur biodiversité (Francis, 2015). L'agriculture met en œuvre la transition agroécologique en adoptant de nouvelles pratiques : réduction de l'utilisation des produits chimiques de synthèse pour la fertilisation et la production des cultures, utilisation des auxiliaires pour la protection des cultures, réduction de la fréquence et de la profondeur du travail du sol et diversification de la rotation (*figure 1*). Des modes de production alternatifs à l'agriculture conventionnelle, comme l'agriculture biodynamique (ABD), l'agriculture biologique (AB) et l'agriculture de conservation des sols (ACS) misent ainsi sur différents leviers agronomiques pour limiter le recours aux intrants chimiques et les perturbations faites aux écosystèmes, et notamment à l'écosystème sol (Garnett *et al.*, 2013 ; Boeraeve *et al.*, 2020). En effet, les cahiers des charges de ces modes de production ont pour point commun de mettre en avant le besoin de préservation de la qualité du sol. Toutefois, ces cahiers des charges reposent sur des obligations de moyens et ne fixent pas d'objectifs en termes de résultats. En conséquence, les bénéfices induits pour la qualité écologique du sol ne peuvent être systématiquement assurés. À l'heure de la transition agroéco-

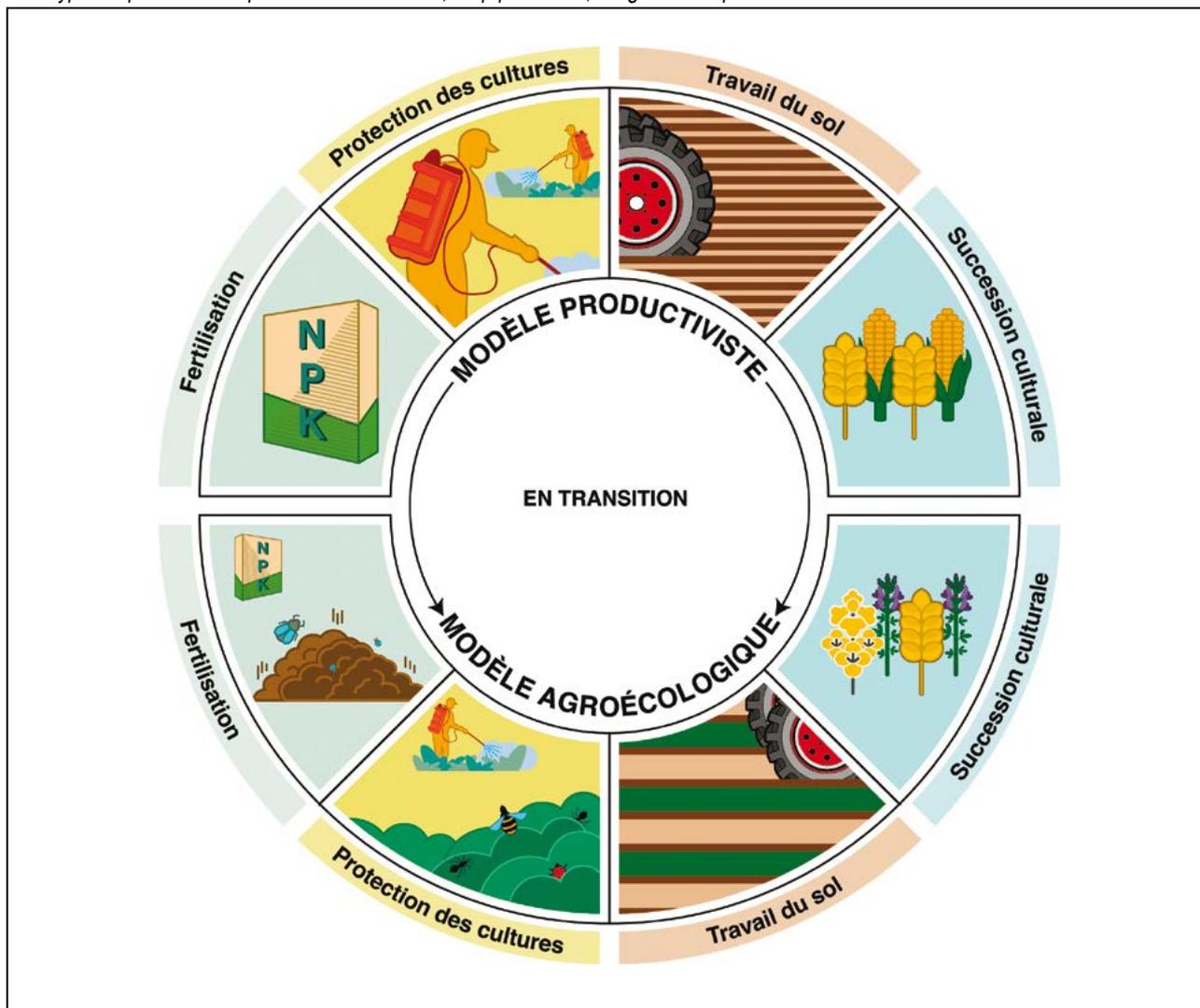
logique, il apparaît donc nécessaire d'objectiver sur une base scientifique l'impact et la résultante de ces différents modes de production sur la qualité écologique du sol.

La qualité écologique du sol – que nous définissons comme la capacité d'un sol à accueillir une grande quantité et diversité d'organismes vivants en interactions et impliqués dans son fonctionnement (Karimi *et al.*, 2020) – est étudiée intensément depuis deux décennies grâce au développement d'outils modernes de recherche qui permettent aujourd'hui de faire des diagnostics robustes (Cortet *et al.*, 1999 ; Ferris *et al.*, 2001 ; Bouchez *et al.*, 2016 ; Stone *et al.*, 2016 ; Moura et Franzener, 2017 ; Gao, 2019 ; Djemiel et Terrat, 2019 ; Maron et Ranjard, 2019). Ces outils et les travaux associés ont permis d'acquérir de solides connaissances sur l'impact des pratiques culturales (Bouchez *et al.*, 2016 ; Karimi *et al.*, 2020). Cependant, l'effet propre d'une pratique ne présage pas de l'impact de la combinaison de pratiques qui constituent les itinéraires techniques au sein des exploitations agricoles. Des phénomènes de compensation ou de synergies peuvent en effet s'opérer lorsque les pratiques sont combinées. Or, comme démontré par Rillig et Lehman (2019), étudier l'impact de toutes les combinaisons de pratiques culturales exigerait de couvrir plus de 100000 combinaisons possibles et ceci dans différentes conditions pédoclimatiques. Pour objectiver l'impact systémique des productions agricoles sur la qualité écologique du sol, il apparaît alors pertinent de s'intéresser aux modes de production agricole (conventionnel, biologique, biodynamie, conservation...).

Dans ce contexte, l'objectif de cette méta-analyse est de collecter et de synthétiser pour la première fois les données issues de la littérature scientifique internationale pour évaluer l'impact des différents modes de production agricole sur la qualité écologique du sol. Pour atteindre cet objectif, nous avons analysé les résultats extraits d'une centaine d'articles scientifiques publiés depuis les années 2000, en intégrant tous les systèmes de production et tous les indicateurs de biodiversité considérés comme opérationnels (microorganismes, faune du sol, activité biologique...). Une analyse bibliométrique du corpus d'articles nous a permis de définir la distribution spatiale et temporelle des résultats obtenus au niveau international. Une synthèse bibliographique

Figure 1 : Evolution des pratiques culturales selon la transition du modèle historique productiviste vers le modèle agroécologique. Quatre types de pratiques sont présentés : fertilisation, protection des cultures, travail du sol et succession culturale.

Figure 1: Evolution of agricultural practices according to the transition from the productivist historical model to the agroecological model. Four types of practices are presented: fertilization, crop protection, tillage and crop rotation.



des articles nous a permis d'évaluer et de hiérarchiser l'impact des différents modes de production agricole sur la qualité écologique du sol. L'interprétation de cette hiérarchie a été faite au regard des différences de pratiques culturales qui distinguent les modes de production, en se basant sur la connaissance de leur impact positif ou négatif sur la qualité biologique des sols. Enfin, l'analyse du manque de connaissances sur certains modes de production ou bioindicateurs de la qualité du sol nous a permis de proposer des pistes de recherche prioritaires dans le but d'augmenter la généralité des tendances observées et la rigueur des conclusions émises. L'enjeu est de parvenir à terme à proposer aux politiques publiques et au conseil agricole des pistes robustes pour développer la transition agroécologique.

La version anglaise de cet article est publiée dans la revue *Environmental Chemistry Letters* (Christel *et al.*, 2020).

LES MODES DE PRODUCTION AGRICOLE

Il y a quatre grands modes de production à l'échelle internationale : l'agriculture conventionnelle (Conv.), l'agriculture de conservation des sols (ACS), l'agriculture biologique (AB) et l'agriculture biodynamique (ABD). À l'échelle française, d'autres modes de production sont apparus ces dernières années

comme HVE, Terravitis... Ces modes de production n'ayant aucun équivalent à l'échelle internationale et la bibliographie s'y intéressant étant très faible, ils n'ont pas été pris en compte dans cette méta-analyse internationale.

Historique et principes fondateurs des modes de production

L'agriculture conventionnelle est issue de la modernisation de l'agriculture initiée pendant la révolution industrielle de la fin du XIX^e siècle (figure 2). Elle fournit aujourd'hui plus de 95 % de l'alimentation mondiale et se caractérise par une forte utilisation des intrants issus de la chimie de synthèse associée à une mécanisation intensive qui a progressivement remplacé la traction animale et la main-d'œuvre agricole (Lernoud et Willer, 2017). Ce mode de production a été rapidement remis en cause dès le début du XX^e siècle avec le lancement d'un mouvement opposé à l'utilisation des intrants issus de la chimie de synthèse en Allemagne, en Angleterre, au Danemark, aux Pays-Bas et en Suisse (Paull, 2011) (figure 2). Il a donné naissance au mode de production biodynamique, approche holistique

de la nature, dont les principes reposent sur une articulation entre le respect des cycles de végétation et le fonctionnement biologique des sols. Peu de temps après et dans la lignée de cette mouvance, Rudolf Steiner a introduit en 1924 dans « le cours aux agriculteurs » prononcé en Allemagne, le mode de production biologique basé sur l'optimisation des ressources naturelles (figure 2). Après la seconde guerre mondiale, Eve Balfour avec le livre *The living soil* paru en 1943 a contribué à l'émergence de l'agriculture biologique et à sa diffusion auprès du grand public (Gill, 2010).

En 1965, l'écologue et zootechnicien Allemand Tischler W. publia ce qui est sans doute le premier livre intitulé « agroécologie » (Wezel *et al.*, 2009). Il faut toutefois attendre les années 80-90 pour voir démarrer véritablement une dynamique sur la transition agroécologique (figure 2). Ceci se traduit par une mobilisation des acteurs du secteur agricole pour concevoir des façons de produire sans nuire à l'environnement. Les modes de production alternatifs anciens tels que l'agriculture biologique et l'agriculture biodynamique connaissent alors une augmentation de leurs surfaces mondiales. Depuis les années 2000, la surface en agriculture biologique a augmenté de 533 % (Lernoud et Willer, 2017) et la surface ayant la cer-

Figure 2 : Evènements historiques fondateurs des trois modes de production alternatifs à l'agriculture conventionnelle étudiés dans la revue : agriculture biologique, agriculture biodynamique et agriculture de conservation des sols.

Figure 2: Historical founding events of the three alternative farming systems to conventional farming studied in the present review: organic farming, biodynamic farming, et soil conservation farming.

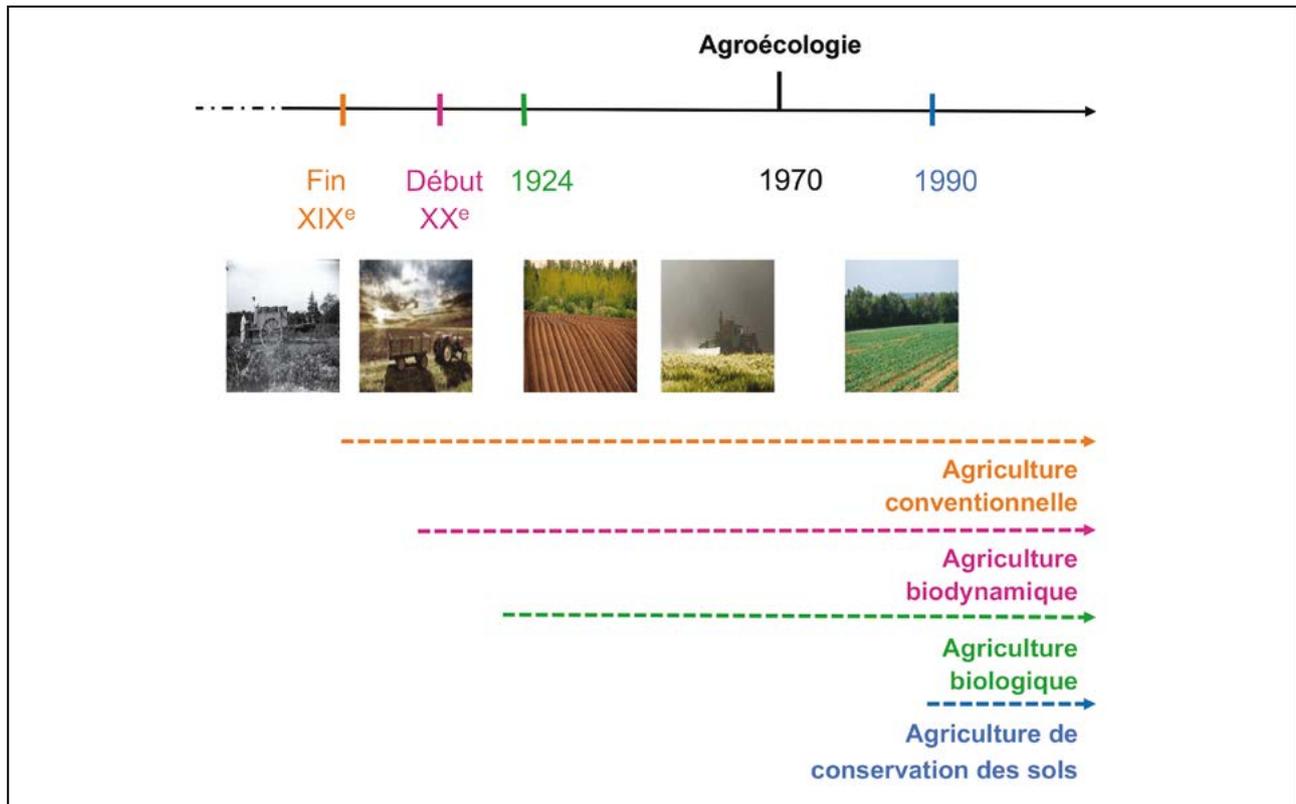
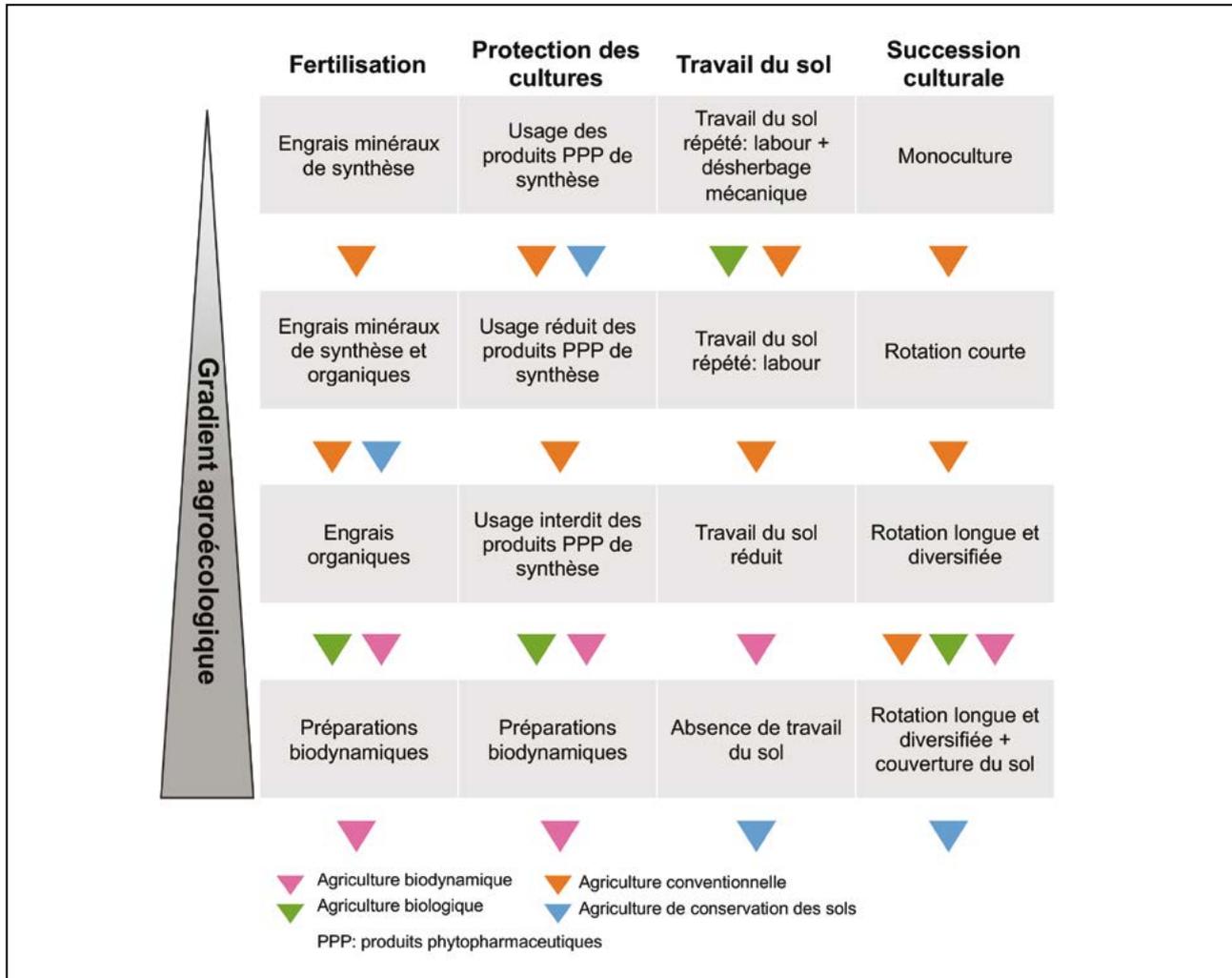


Figure 3 : Pratiques culturales en fonction du mode de production. En colonne, quatre sous-pratiques sont présentées pour les quatre principales familles de pratiques (fertilisation, protection des cultures, travail du sol, succession culturale). Les sous-pratiques mises en œuvre dans un mode de production sont indiquées par un triangle coloré. Si une pratique principale est mise en œuvre par différentes sous-pratiques dans le mode de production, la colonne contient plusieurs triangles d'une même couleur. Pour exemple, l'agriculture conventionnelle peut mettre en œuvre deux sous-pratiques pour la fertilisation : utilisation uniquement des engrais minéraux de synthèse ou utilisation combinée des engrais minéraux de synthèse et des engrais organiques.

Figure 3: Agricultural practices according to the farming system. In column, four sub-practices are presented for the main practices (fertilization, crop protection, tillage, crop rotation). The sub-practices implemented in each farming system are indicated by a colored triangle. If a main practice is implemented by different sub-practices in a farming system, the column contains several triangles of a same color. As an example, conventional farming can use two sub-practices for fertilization: use of only synthetic chemical fertilization or use of both synthetic chemical and organic fertilization.



tification Demeter a doublé (Willer *et al.*, 2020). De nouveaux modes de production sont également investis à différentes échelles territoriales. L'agriculture de conservation des sols (ACS) s'inscrit dans un cadre de définition donné par la FAO depuis les années 90 et satisfait à trois principes : réduction du travail du sol, couverture du sol (morte ou vivante) et allongement des rotations (*figure 2*) (FAO, 2010). Historiquement, ces pratiques ont été développées en réponse aux problématiques

d'érosion rencontrées aux États-Unis dans les années trente et le phénomène de « Dust bowls ». Depuis plus de 20 ans, ce mode de production, implanté à grande échelle aux États-Unis et en Amérique du Sud, se développe aussi en Europe.

Pratiques culturelles et spécificités des modes de production

Les quatre modes de production agricole diffèrent par des pratiques spécifiques regroupées en quatre domaines : la fertilisation, la protection des cultures, le travail du sol et la succession culturale. La *figure 3* présente les pratiques culturelles mises en œuvre de façon distincte au sein des itinéraires techniques des différents modes de production étudiés.

En agriculture conventionnelle et en agriculture de conservation des sols, la fertilisation, à base d'engrais minéraux de synthèse, peut être complétée par des amendements organiques. En agriculture biologique et agriculture biodynamique, la fertilisation se fait exclusivement par l'apport de matière organique (composts, engrais vert, fumiers de ferme) (EU Regulation, 2018). En plus, l'agriculture biodynamique utilise des préparations spécifiques pour intensifier les interactions au sein du sol, entre le sol et les plantes ou, de façon plus vaste, entre ces éléments et le système solaire (Demeter International, 2020). Ces préparations sont pulvérisées sur le sol, sur les plantes ou sur le compost.

L'agriculture conventionnelle et l'agriculture de conservation des sols autorisent l'utilisation de produits issus de la chimie de synthèse pour la protection des cultures, mais les doses et fréquences d'application diffèrent entre ces modes de production. En agriculture biologique et agriculture biodynamique, les produits issus de la chimie de synthèse sont interdits, le cuivre et le soufre sont utilisés comme seuls moyens naturels de protection chimique des cultures (EU Regulation, 2018 ; Demeter National, 2020). Les solutions issues du biocontrôle sont également employées.

En agriculture conventionnelle et en agriculture biologique, le travail du sol intensif est utilisé pour la préparation des semis et dans la lutte contre les adventices. L'agriculture de conservation des sols et l'agriculture biodynamique simplifient à différents degrés le travail du sol (réduction jusqu'à une possible suppression pour l'ACS et simplification pour l'ABD). Ces modes de production privilégient un allongement et une diversification des rotations culturales (FAO, 2010 ; Demeter International, 2020).

QUALITÉ ÉCOLOGIQUE DU SOL : DÉFINITION, INTÉRÊTS ET OUTILS DE MESURES

Intérêt des paramètres biologiques des organismes du sol

Le sol représente un véritable réservoir de biodiversité. Un hectare de sol contient 15 tonnes d'organismes soit 1,5 kg d'organismes vivants par mètre carré (Jeffery *et al.*, 2010). À travers leurs activités, les organismes du sol portent des fonctions bio-

logiques clés pour le fonctionnement du sol et agissent sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Barrios, 2007 ; Bardgett, 2014) (*figure 4*).

Les organismes de la macrofaune, qualifiés d'ingénieurs du sol, sont ainsi capables de transformer physiquement leur environnement sol et ainsi de modifier la dynamique des ressources en eau et en nutriments, ou encore les habitats (Jones *et al.*, 1996). Les vers de terre, invertébrés emblématiques de la faune du sol, ont une activité capitale car ils modifient la composition du sol en recyclant la matière organique et en assurant la formation d'agrégats stables (Bouché, 1972). Leur activité (bioturbation, galeries, rejets) ainsi que celle d'autres macro-invertébrés (termites, fourmis, araignées) contribuent à l'entretien de la porosité du sol et au maintien de sa stabilité structurale. Les organismes de la mésofaune et de la microfaune agissent sur les propriétés chimiques et biologiques du sol car ils participent à la micro-fragmentation et au brassage des matières organiques, à la dispersion et à la régulation de la microflore ou encore à la régulation des populations (van der Putten *et al.*, 2010). Les collemboles, principaux représentants des arthropodes de la mésofaune, se nourrissent de débris végétaux en décomposition et de microorganismes et participent ainsi à la régulation de leurs populations (Gobat *et al.*, 2010).

Les nématodes jouent un rôle important au sein du réseau trophique (Yeates *et al.*, 2008). Ils contribuent au recyclage des nutriments et à la régulation des populations de microorganismes (van der Putten *et al.*, 2010). Les microorganismes (bactéries, archées et champignons) jouent un rôle crucial pour les propriétés chimiques et biologiques du sol. Ils participent au recyclage des nutriments et contribuent ainsi à la biodisponibilité d'éléments essentiels à la production primaire (Gobat *et al.*, 2010). Ils sont par exemple responsables des transformations du cycle de l'azote par fixation de l'azote atmosphérique et par sa minéralisation (Lavelle *et al.*, 2006 ; Maron et Ranjard, 2019). Ils concourent au maintien de la structure du sol et aussi à la préservation d'un bon état sanitaire par dégradation des polluants ou modification de l'espèce chimique des métaux (Maron et Ranjard, 2019).

Toutes ces fonctions biologiques déterminent les fonctions agronomiques du sol, elles-mêmes à l'origine des services écosystémiques de support, de production et de régulation (*figure 4*).

La réactivité précoce des différents groupes d'organismes du sol, couplée à leur implication dans les fonctions essentielles à la performance et la durabilité des productions agricoles, confère aux paramètres biologiques d'abondance, de diversité, et d'activité des organismes du sol un statut d'indicateurs de la qualité écologique du sol. L'évaluation de cette qualité écologique, par le biais d'outils de mesure de ces paramètres d'abondance, de diversité et d'activité des organismes vivants, sert de base pour évaluer l'empreinte environnementale des différents modes de production agricole mais aussi leur durabilité.

Les Indicateurs de la qualité écologique du sol

La littérature scientifique internationale montre qu'il existe des paramètres biologiques mesurables et utilisables en tant qu'indicateurs de la qualité écologique du sol pour l'ensemble des organismes répartis au sein de la macrofaune, de la mésofaune, de la microfaune et des microorganismes (Stork et Eggleton, 1992; Bardgett et Mcalister, 1999; Bouchez *et al.*, 2016; Stone *et al.*, 2016). L'application de ces outils à différentes échelles spatiales et temporelles, associée à l'usage d'un référentiel d'interprétation, renseigne sur l'évolution de la qualité écologique du sol en fonction des pratiques et des modes de production (Dequiedt *et al.*, 2009; Cluzeau *et al.*, 2012; Hedde, 2012; Karimi *et al.*, 2018). Toutefois, les outils proposés aujourd'hui pour générer des données sur la qualité écologique du sol n'ont pas tous le même niveau d'opérationnalité. L'évolution des outils de biologie moléculaire et de biochimie donne désormais accès à des mesures d'abondance, de diversité et d'activité standardisées et applicables en routine pour les microorganismes (Bouchez *et al.*, 2016; Djemiel et Terrat, 2019). Au contraire, les méthodes de piégeage des organismes de la micro et de la macrofaune mises en place sur le terrain exigent un investissement conséquent en temps et en moyens humains (Cortet et Hedde, 2020).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Critères de la recherche bibliographique

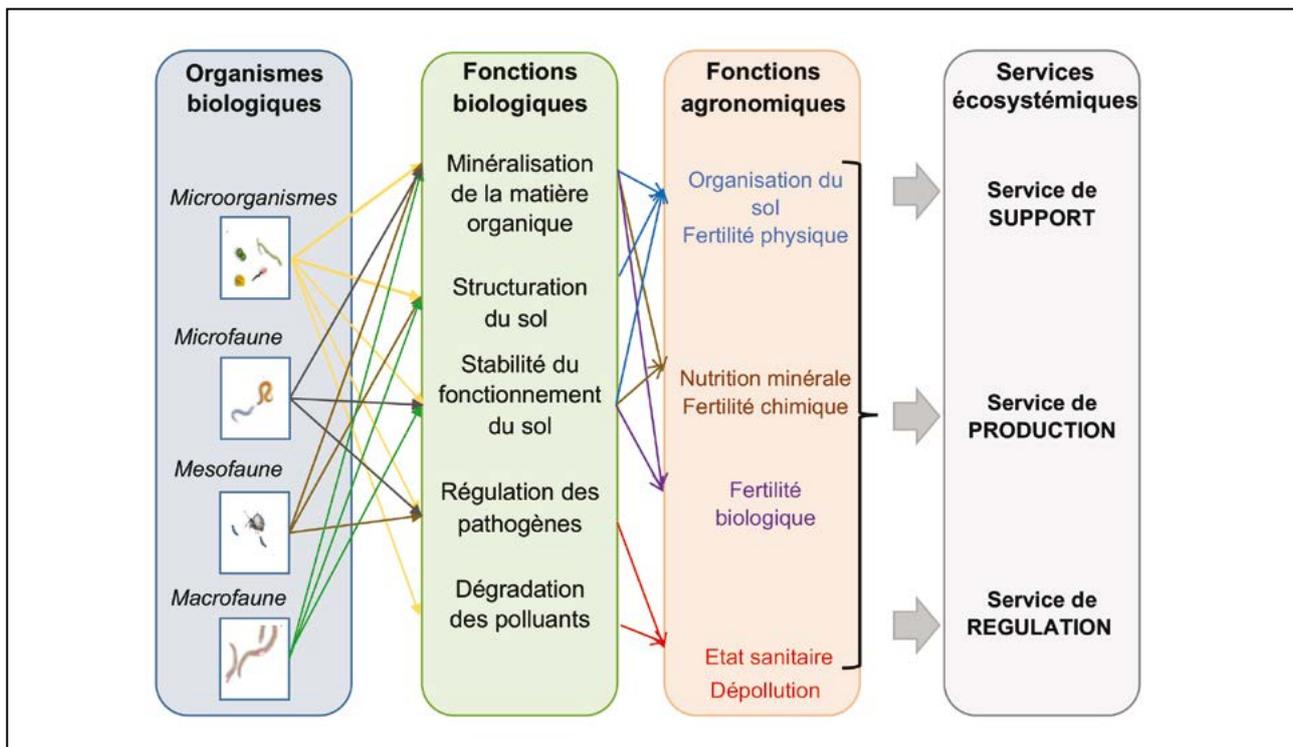
La recherche bibliographique a été réalisée en utilisant la base de données Web of Science (WoS) de mars à juin 2020. Pour trouver les publications qui comparent l'agriculture conventionnelle et l'agriculture de conservation des sols, la combinaison de mots-clés utilisée était la suivante :

Soil
 ET (*bio* OU * diversity OU ecology)
 ET (conventional PRES DE (farming OU agri*))
 ET (conservation PRES DE (farming OU agri*))
 ET (system OU manage* OU regime) PAS practice*

La combinaison a été utilisée pour les six comparaisons étudiées (agriculture conventionnelle/agriculture biologique, agriculture conventionnelle/agriculture biodynamique, agriculture conventionnelle/agriculture de conservation des sols, agriculture biologique/agriculture de conservation des sols, agriculture biologique/agriculture biodynamique) en remplaçant les mots « conventionnel » et « conservation » par les mots-clés appropriés (conventionnel, conservation, biologique et biodynamique). Les opérateurs booléens de l'équation de recherche précisent

Figure 4 : Lien entre patrimoine biologique, fonctions et services écosystémiques (modifié d'après Maron et Ranjard, 2019).

Figure 4: Link between biological heritage, functions, and ecosystem services (modified from Maron et Ranjard, 2019).



l'arrangement des mots-clés à trouver dans les résultats de la recherche : « ET » indique que les mots doivent apparaître simultanément, « OU » indique que l'un des termes au moins doit apparaître, « PRES DE » indique que les mots doivent apparaître selon l'ordre donné et « PAS » indique que le terme doit être exclu des résultats. Le mot avec le signe * est recherché dans les publications au singulier/pluriel ou avec des préfixes et des suffixes non spécifiés dans l'équation.

Parmi les champs disciplinaires proposés par le WoS, seuls les résultats associés aux champs disciplinaires de la science du sol, de la biologie et de l'écologie ont été retenus. L'étude est limitée temporellement aux travaux publiés à partir de l'année 2000 afin d'avoir une comparaison rigoureuse des résultats. L'année 2000 représente en effet une rupture technologique, avec de fortes évolutions techniques (plan Ecophyto, mécanisation contrôlée, agriculture de précision, lignée végétale, bio-contrôle...) pour les modes de production historiques mis en œuvre avant les années 2000 (Conventionnel, AB, ABD). Les années 2000 correspondent aussi à une forte évolution technologique des outils de mesures de la biologie du sol et au remplacement d'outils obsolètes et moins robustes, notamment pour les microorganismes (Maron *et al.*, 2007).

Terminologie de l'étude

Les paramètres biologiques sont associés aux mots-clés *soil*, *bio** ou *diversity** ou *ecology*. Ils correspondent aux paramètres mesurables des organismes du sol ou de leur communauté (abondance, diversité, activité). Bien que ces paramètres ne soient pas encore validés en tant qu'indicateurs opérationnels de la qualité écologique pour tous les groupes d'organismes du sol (standardisation non aboutie, manque de référentiel d'interprétation), ils sont reconnus comme suffisamment sensibles aux pratiques culturales pour permettre la comparaison des effets des modes de production. Tous les articles utilisés pour la méta-analyse sont listés dans le tableau S1 de la partie information supplémentaire.

ANALYSE BIBLIOMÉTRIQUE

La recherche bibliographique menée selon les critères précédemment décrits a identifié 423 articles portant sur les modes de production agricole et la qualité écologique du sol. Suite à la lecture de leur résumé, les articles retenus sont ceux qui ont privilégié une vision systémique des modes de production. Les articles qui étudiaient seulement une partie des pratiques spécifiques au mode de production sont exclus (pour exemple, les articles étudiant le semis-direct ou le travail du sol réduit pour l'agriculture de conservation des sols sans intégrer les pratiques de couvert et de rotations sont éliminés). Un tel filtre réduit le corpus pour l'étude bibliographique à environ une centaine

d'articles scientifiques internationaux publiés dans des revues de rang A. Les modes de production les plus référencés sont l'agriculture conventionnelle et l'agriculture biologique avec respectivement 106 et 104 articles. L'agriculture biodynamique vient en troisième position avec 24 articles. L'agriculture de conservation des sols compte seulement 3 articles.

Dynamique temporelle du corpus d'articles

Depuis 2000, le nombre de publications sur le sujet de l'impact des modes de production agricole sur la qualité écologique du sol augmente (*figure 5*). L'intégration croissante de la composante environnementale au sein des politiques publiques et des enjeux de la recherche pourrait expliquer cette dynamique. La période 2000-2020 est en effet jalonnée d'événements fondateurs de la prise en compte de l'importance de la biodiversité des sols et des services écosystémiques. L'évolution des outils de la recherche en écologie moléculaire pourrait aussi expliquer l'augmentation du nombre de publications sur le sujet.

Distribution géographique du corpus d'articles

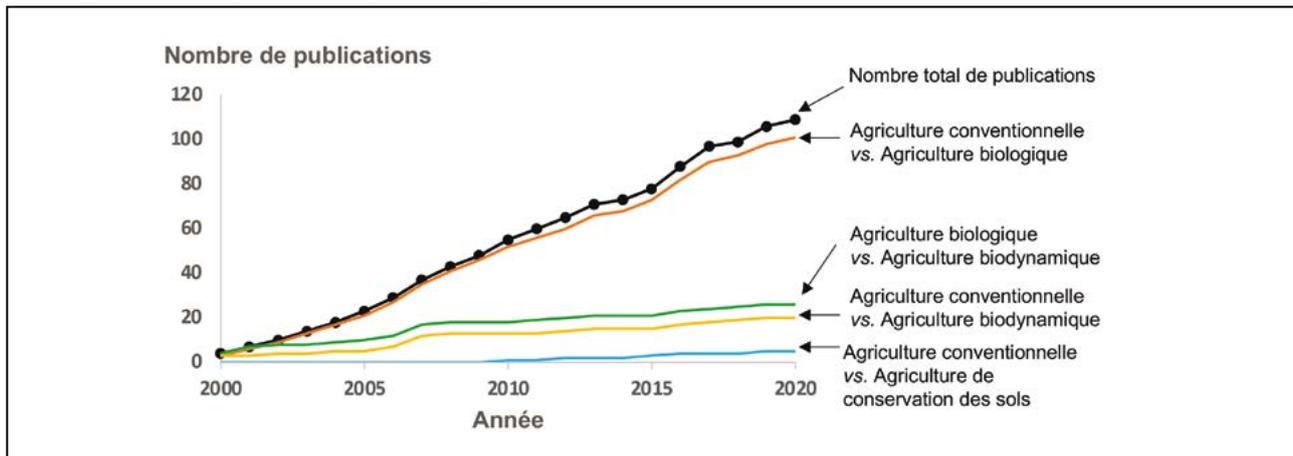
Sur l'ensemble des publications du corpus étudié, la plupart des recherches menées se situent en Amérique du Nord et en Europe (*figure 6*). Les États-Unis comptent le plus grand nombre de sites (20 %). En Europe, qui représente 52 % des sites du corpus, la Suisse arrive en première position avec 14 % en raison du nombre important d'études portant sur un même essai nommé « DOK-trial » et porté par le FiBL (Research Institute of Organic Agriculture). Les sites en Italie représentent 6 % des sites du corpus. Quant aux sites en France et aux Pays-Bas, ils représentent 5 % des sites du corpus. Ce résultat montre un recouvrement entre les pays les plus producteurs de matières agricoles et ceux proposant le plus de sites d'étude, probablement dû à l'importance des enjeux pour la durabilité de l'agriculture dans ces pays.

IMPACT DES MODES DE PRODUCTION SUR LA QUALITÉ ÉCOLOGIQUE DU SOL

La synthèse scientifique est organisée sur la base de comparaisons entre modes de production. Quatre comparaisons sont présentées : agriculture conventionnelle vs. agriculture biologique, agriculture conventionnelle vs. agriculture biodynamique, agriculture biologique vs. agriculture biodynamique et agriculture conventionnelle vs. agriculture de conservation des sols. Pour chaque comparaison, le bilan des connaissances est présenté sous la forme d'une figure synthétique (*figures 7, 8, 9 et 10*). Le guide de lecture ci-dessous est valable pour les quatre figures.

Figure 5 : Nombre cumulé de publications de 2000 à 2020 comparant les modes de production parmi l'ensemble des publications utilisées pour la revue (une publication peut comparer plusieurs couples).

Figure 5: Cumulative number of publications over the 2000-2020 comparing farming systems among all the publications of the collection (several pairs were compared in some publications).



La lecture de la figure s'appuie sur deux niveaux de description de la qualité écologique du sol. Le premier niveau de lecture est celui du groupe d'organismes avec sept groupes d'organismes répertoriés : lombrics, macro-arthropodes, micro-arthropodes, nématodes, microorganismes totaux, bactéries, champignons. Le second niveau de lecture est celui des paramètres biologiques des organismes : abondance, diversité et fonction. Les effets sur la qualité écologique du sol du mode de production indiqué sur le cercle extérieur de la figure sont comparés à ceux du mode de production de référence (cercle intérieur) à l'aide de 5 catégories :

- Les résultats des études qui montrent un effet similaire des deux modes de production sont indiqués par des cercles placés sur la ligne médiane (signe =), tracée en rouge.
- Les résultats des études qui montrent un effet positif (ou négatif) d'un mode de production par rapport au mode de production de référence sont indiqués par des cercles placés en première position au-dessus (ou en dessous) de la ligne médiane, signe \geq (ou signe \leq).
- Les résultats des études qui montrent un effet significativement positif (ou négatif) d'un mode de production par rapport au mode de production de référence sont indiqués par des cercles placés en deuxième position au-dessus (ou en dessous) de la ligne médiane, signe $>$ (ou signe $<$).

Pour chaque catégorie, la taille du cercle renseigne sur la robustesse du résultat, c'est-à-dire du nombre de mesures qui montrent un même effet pour un même système de production : cercle de petite taille pour un nombre de résultats similaires < 3 – cercle de taille moyenne pour un nombre de résultats similaires compris entre 3 et 10 – cercle de grande taille pour un nombre de résultats similaires supérieur à 10.

La couleur du cercle précise le système de production de l'étude (marron = arboriculture, jaune = grande culture, orange = maraîchage, violet = viticulture, vert = prairie).

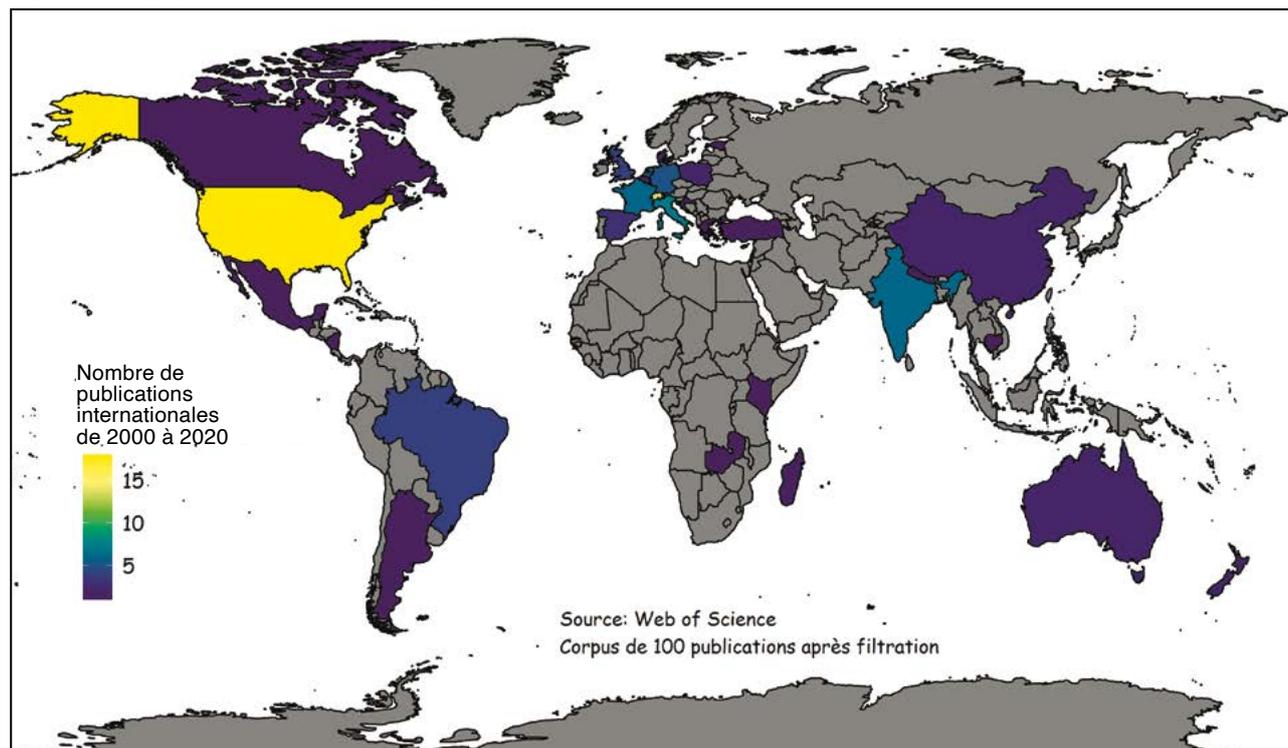
Comparaison des modes de production agriculture conventionnelle et agriculture biologique

Bilan écologique pour tous les systèmes de production

L'ensemble des résultats sur les paramètres biologiques obtenus pour la comparaison du mode de production conventionnel (cercle intérieur) et biologique (cercle extérieur) est présenté sous la forme d'une figure synthétique (figure 7).

Sur l'ensemble des résultats extraits de 101 références, les microorganismes sont les organismes les plus ciblés avec 50 % des résultats pour les microorganismes totaux auxquels s'ajoutent 11 % des résultats pour les bactéries et 11 % des résultats pour les champignons. Les nématodes viennent en seconde position avec 14 % des résultats. Les macro-arthropodes et les vers de terre comptent pour moins de 10 % des résultats. Les micro-arthropodes sont minoritaires avec moins de 5 % des résultats.

Cette figure permet de mettre en évidence des tendances génériques pour l'abondance des organismes de la faune du sol et pour l'ensemble des paramètres des microorganismes. L'abondance des organismes de la faune et des microorganismes du sol est plus élevée en agriculture biologique qu'en conventionnel avec 75 % des mesures correspondantes montrant cette aug-

Figure 6 : Répartition géographique des sites d'étude considérés dans le corpus d'articles analysé.**Figure 6:** Geographic distribution of the study sites considered in the collection of publications.

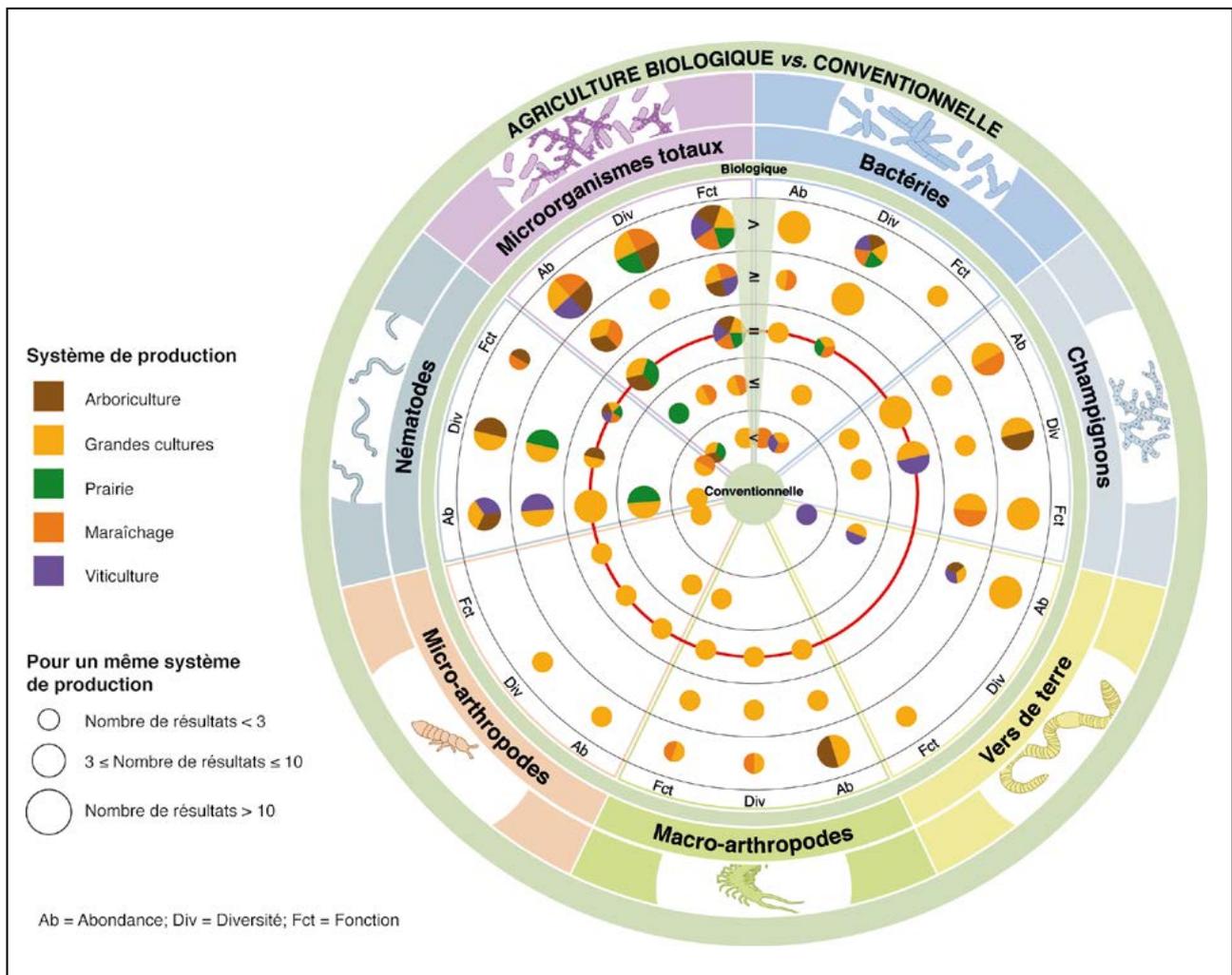
mentation. De même, la diversité des microorganismes totaux est plus élevée en agriculture biologique qu'en conventionnel puisque 87 % des mesures montrent un effet positif de l'agriculture biologique en comparaison au conventionnel. L'activité des microorganismes est elle aussi fortement stimulée en agriculture biologique, avec 83 % des mesures montrant un effet positif de l'agriculture biologique en comparaison au conventionnel.

L'augmentation des valeurs d'abondance en agriculture biologique concerne principalement la biomasse des lombrics, des macro-arthropodes, des nématodes et des microorganismes. Après un temps de conversion supérieur à 10 ans, une augmentation de 88 % de l'abondance des lombrics (Scullion *et al.*, 2007) et de 700 % de celle des nématodes (Henneron *et al.*, 2015) a été observée en agriculture biologique. Wachter *et al.* (2019) rapportent une augmentation de l'abondance microbienne de 24 % à 39 % en agriculture biologique. Toutefois, d'autres auteurs ont observé une augmentation de l'abondance des vers de terre de 200 % en conventionnel par rapport à un même système converti en agriculture biologique depuis sept ans (Pelosi *et al.*, 2015). À l'échelle des groupes trophiques des nématodes, les résultats sont aussi plus variables. Ainsi, si Birkhofer *et al.* (2008) observent une augmentation de 33 % de l'abondance des nématodes herbivores en agriculture biologique par rapport au conventionnel, il rapporte aussi une baisse de 43 % de

l'abondance des nématodes fongivores en agriculture biologique. La disparité des conclusions entre les différentes études de la littérature peut être attribuée à différents facteurs. Ainsi, la période d'échantillonnage influe sur les résultats en raison de la sensibilité des nématodes aux conditions d'humidité (Jaffuel *et al.*, 2016; Quist *et al.*, 2016; Ilieva-Makulec *et al.*, 2017). La sensibilité des nématodes à la disponibilité en matière organique induit aussi une réponse différente en fonction du type de sol (Quist *et al.*, 2016; Ilieva-Makulec *et al.*, 2017). L'effet du mode de production peut être contrebalancé par l'effet du type de sol et de la période d'échantillonnage (Ilieva-Makulec *et al.*, 2017). Les valeurs d'abondance des nématodes mesurées sur des sols sableux en automne sont plus élevées en agriculture biologique qu'en conventionnel tandis que les valeurs mesurées sur des sols argileux ou au printemps montrent une tendance inverse (Ilieva-Makulec *et al.*, 2017). Le type pédo-climatique influence également l'impact des modes de production sur les communautés microbiennes : l'augmentation de la biomasse microbienne en agriculture biologique est supérieure dans des sols tropicaux par rapport à des sols de climats tempérés (Santos *et al.*, 2012).

Figure 7 : Comparaison des effets de l'agriculture conventionnelle et de l'agriculture biologique sur les paramètres biologiques du sol – abondance (Ab), diversité (Div) et fonction (Fct) – des différents organismes du sol : microorganismes totaux, bactéries, champignons, vers de terre, macro-arthropodes, micro-arthropodes, nématodes. Les résultats des études montrant des effets similaires des deux modes de production sont indiqués par des cercles sur la ligne rouge médiane (signe =). Les cercles placés au-dessus (en dessous) de la ligne médiane rouge indiquent les résultats des études montrant un effet positif (négatif) de l'agriculture biologique par rapport à la référence, l'agriculture conventionnelle. Plus le cercle est éloigné de la ligne médiane, plus le résultat est significatif. La taille des cercles indique le nombre de mesures qui montre un même effet pour un même système de production. La couleur du cercle indique le système de production.

Figure 7: Comparative effects of the conventional et organic farming systems on the soil biological parameters - abundance (Ab), diversity (Div) et fonction (Fct) - of the different soil organisms: total microorganisms, bacteria, fungi, earthworms, macro-arthropods, micro-arthropods, nematodes. The results of the studies showing similar effects of the two farming systems are indicated by circles on the median red line (= sign). Circles placed above (or below) the median red line indicate the results of the studies showing a positive (or negative) effect of organic farming compared with the reference conventional farming. The further the circles are from the median line, the more significant the result. The size of the circles indicates the number of measurements that showed the same effect for the same cropping system. The color of the circle specifies cropping systems.



Comparaison des modes de production agriculture conventionnelle et agriculture biodynamique

Bilan écologique pour tous les systèmes de production

L'ensemble des résultats sur les paramètres biologiques obtenus pour la comparaison conventionnel (cercle intérieur) et agriculture biodynamique (cercle extérieur) est présenté sous la forme d'une figure synthétique (figure 8).

Sur l'ensemble des résultats obtenus à partir des 21 articles référencés, les microorganismes sont les organismes les plus ciblés car le groupe des microorganismes totaux représente 39 % des résultats auxquels s'ajoutent 20 % des résultats pour les champignons et 15 % pour les bactéries. Les nématodes suivent avec 9 % des résultats. Les vers de terre et les micro-arthropodes comptent pour respectivement, 7 % et 6 % des résultats. Les macro-arthropodes sont minoritaires avec 4 % des résultats.

Les résultats de cette synthèse mettent en évidence des tendances génériques pour le groupe des microorganismes du sol. L'agriculture biodynamique améliore l'abondance des microorganismes totaux en comparaison à l'agriculture conventionnelle avec 91 % des mesures qui montrent une augmentation. Plus spécifiquement, les mesures d'abondance pour les bactéries vont également dans ce sens. L'activité des microorganismes est davantage stimulée en agriculture biodynamique par rapport à l'agriculture conventionnelle puisque 67 % des mesures d'activité montrent un effet positif de l'agriculture biodynamique par rapport au conventionnel.

L'augmentation de l'abondance des microorganismes en agriculture biodynamique par rapport au conventionnel correspond à une augmentation des valeurs de biomasses microbiennes carbonée et azotée. Pour exemples, Birkhofer *et al.* (2008) ont observé une augmentation de 100 % de la biomasse carbonée et de 270 % de la biomasse microbienne azotée en agriculture biodynamique par rapport au conventionnel. Certains auteurs trouvent une diversité fonctionnelle des microorganismes supérieure en agriculture biodynamique en comparaison au conventionnel pour tout type de fertilisation (Mäder *et al.*, 2002). Ces auteurs ont observé une augmentation de 62 % de l'activité enzymatique en agriculture biodynamique par rapport au conventionnel (Mäder *et al.*, 2000). Globalement, l'agriculture biodynamique améliore donc significativement la qualité micro-biologique du sol par rapport à l'agriculture conventionnelle.

Pour la faune du sol, il y a peu de résultats disponibles, ce qui entraîne une faible généralité des tendances observées. Sur le site de l'essai « DOK – trial » porté par le FiBL, un doublement de l'abondance des vers de terre, mais aussi des *enchytréides* et des nématodes (excepté pour les nématodes fongivores) a été observé en agriculture biodynamique par rapport au convention-

nel (Birkhofer *et al.*, 2008). Toutefois, ces différences n'étaient plus significatives lorsque la fertilisation organique était mise en œuvre dans le mode de production conventionnel (Birkhofer *et al.*, 2008).

Bilan écologique en fonction des systèmes de production

Sur l'ensemble des résultats obtenus, le système de production en grande culture représente la majorité des mesures (83 %). Le reste des résultats est obtenu sur des sites en viticulture (13 %) et des sites en prairies (4 %). Les paramètres biologiques mesurés montrent un effet globalement favorable de l'agriculture biodynamique en grandes cultures puisque 76 % des mesures réalisées montrent une aggradation. En viticulture, 56 % des résultats indiquent un effet positif de l'agriculture biodynamique. Ceux obtenus en prairie montrent tous un effet similaire des deux modes de production. Toutefois, les résultats obtenus pour ces deux derniers systèmes de production sont à nuancer puisqu'ils manquent de généralité. Les systèmes en maraîchage et en arboriculture ne sont pas référencés.

Les effets positifs de l'agriculture biologique sur la qualité écologique du sol dépendent des systèmes de production, avec les effets les plus importants en grande culture et en viticulture tandis qu'aucun effet n'est observé pour les prairies.

Comparaison des modes de production agriculture biologique et agriculture biodynamique

Bilan écologique pour tous les systèmes de production

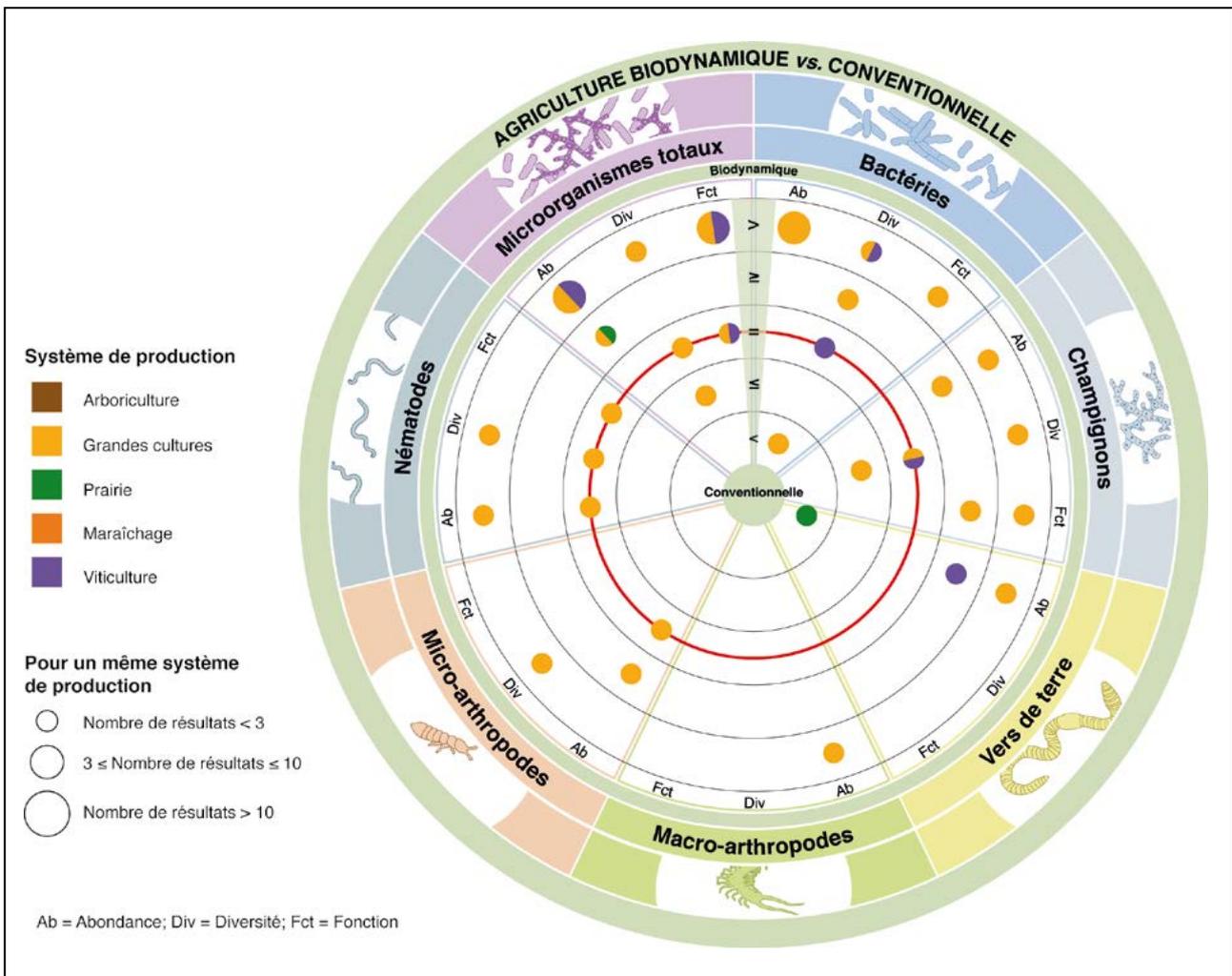
L'ensemble des résultats sur les paramètres biologiques obtenus pour la comparaison agriculture biologique (cercle intérieur) et agriculture biodynamique (cercle extérieur) est présenté sous la forme d'une figure synthétique (figure 9).

Sur l'ensemble des résultats obtenus à partir des 23 articles référencés, les microorganismes sont les organismes les plus ciblés avec 50 % des résultats pour le groupe des microorganismes totaux auxquels s'ajoutent 12 % des résultats pour les bactéries et 12 % pour les champignons. Les vers de terre et les nématodes viennent en troisième position avec pour chacun 9 % des résultats. Les macro-arthropodes et les micro-arthropodes sont minoritaires avec moins de 5 % des résultats.

Les résultats de cette synthèse mettent en évidence des tendances génériques pour les paramètres des microorganismes. L'abondance des microorganismes est stimulée en agriculture biodynamique en comparaison à l'agriculture biologique car 71 % des mesures d'abondance montrent une augmentation. L'activité des microorganismes est également plus stimulée

Figure 8 : Comparaison des effets de l'agriculture conventionnelle et de l'agriculture biodynamique sur les paramètres biologiques du sol – abondance (Ab), diversité (Div) et fonction (Fct) – des différents organismes du sol : microorganismes totaux, bactéries, champignons, vers de terre, macro-arthropodes, micro-arthropodes, nématodes. Les résultats des études montrant des effets similaires des deux modes de production sont indiqués par des cercles sur la ligne rouge médiane (signe =). Les cercles placés au-dessus (en dessous) de la ligne médiane rouge indiquent les résultats des études montrant un effet positif (négatif) de l'agriculture biodynamique par rapport à la référence, l'agriculture conventionnelle. Plus le cercle est éloigné de la ligne médiane, plus le résultat est significatif. La taille des cercles indique le nombre de mesures qui montre un même effet pour un même système de production. La couleur du cercle indique le système de production.

Figure 8: Comparative effects of the conventional and biodynamic farming systems on the soil biological parameters - abundance (Ab), diversity (Div) et fonction (Fct) - of the different soil organisms: total microorganisms, bacteria, fungi, earthworms, macro-arthropods, micro-arthropods, nematodes. The results of the studies showing similar effects of the two farming systems are indicated by circles on the median red line (= sign). Circles placed above (or below) the median red line indicate the results of the studies showing a positive (or negative) effect of biodynamic farming compared with the reference conventional farming. The further the circles are from the median line, the more significant the result. The size of the circle indicates the number of measurements that showed the same effect for the same cropping system. The color of the circle specifies cropping systems.



en agriculture biodynamique qu'en agriculture biologique avec 54 % des mesures montrant un effet positif. Pour la faune du sol, 86 % des résultats montrent un effet similaire de l'agriculture biodynamique en comparaison à l'agriculture biologique mais le nombre de résultats attribués à chaque paramètre biologique est trop faible pour identifier des tendances par indicateur.

La stimulation des microorganismes en agriculture biodynamique correspond par exemple à une augmentation de la biomasse microbienne de 11 % par rapport à l'agriculture biologique (Reeve *et al.*, 2010). Dans cette même étude, Reeve *et al.* (2010) rapportent que l'activité de respiration microbienne peut être de 54 % plus élevée en agriculture biodynamique qu'en agriculture biologique et attribuent ce résultat à une régulation de l'acidité du sol par les préparations en agriculture biodynamique. Dans la même ligne, l'activité de l'enzyme déshydrogénase est augmentée de 29 % en agriculture biodynamique en comparaison à l'agriculture biologique (Fließbach *et al.*, 2007). Ces auteurs concluent également à une meilleure efficacité énergétique des microorganismes en agriculture biodynamique suite à l'observation d'une baisse de 52 % de la valeur du quotient métabolique. Toutefois, les propriétés inhérentes du sol comme le contenu en argiles ou en limons peuvent, *via* la régulation des transformations des cycles du carbone et de l'azote, avoir des effets plus marqués que celui de l'agriculture biodynamique sur la biomasse microbienne (Cookson *et al.*, 2006). Au-delà des communautés microbiennes, certains résultats montrent que les vers de terre peuvent aussi être sensibles aux pratiques mises en œuvre en agriculture biodynamique, avec notamment une abondance de 49 % plus élevée en agriculture biodynamique qu'en agriculture biologique (Meissner *et al.*, 2019).

Si certains travaux montrent une aggradation de la qualité écologique du sol en agriculture biodynamique par rapport à l'agriculture biologique, une absence de différence entre les deux modes de production est aussi observée pour 52 % des mesures pour l'ensemble des organismes. Concernant les paramètres microbiens, Hendgen *et al.* (2018) n'observent ainsi pas de différence entre l'agriculture biodynamique et l'agriculture biologique en termes de composition et de richesse des communautés de champignons avec l'ajout des préparations biodynamiques. En accord avec ces conclusions, d'autres travaux ne montrent pas de différence d'impact entre les deux modes de production en terme d'abondance et d'activité microbienne, laissant supposer que la fertilisation organique influence davantage ces communautés que les préparations biodynamiques (Carpenter-Boggs *et al.*, 2000a; Carpenter-Boggs *et al.*, 2000b; Mäder *et al.*, 2002; Birkhofer *et al.*, 2008).

En ce qui concerne la faune du sol, 60 % des mesures d'abondance des lombrics et la totalité des mesures d'abondance des macro-arthropodes et des micro-arthropodes indiquent un effet similaire des deux modes de production. De même, Birkhofer *et al.* (2008) n'observent pas de différence pour l'abondance des collemboles entre les deux modes de production. Ces auteurs

précisent tout de même que la valeur d'abondance mesurée est très faible. La tendance indiquant un effet similaire de l'agriculture biodynamique et de l'agriculture biologique sur la faune du sol manque de généralité par le faible nombre d'études. Il est donc nécessaire d'investir davantage dans la comparaison des effets de ces modes de production sur la faune du sol pour conclure de façon robuste.

Globalement, cette synthèse montre que l'agriculture biodynamique serait plus vertueuse que l'agriculture biologique pour la qualité écologique du sol. Toutefois, cette différence entre l'agriculture biodynamique et l'agriculture biologique est à nuancer au regard du nombre important de mesures qui indiquent un effet similaire de ces deux modes de production et du relatif faible nombre d'articles étudiés pour la comparaison.

Bilan écologique en fonction des systèmes de production

Sur l'ensemble des résultats obtenus, le système de production en grande culture compte pour 75 % des mesures réalisées. La viticulture se trouve en seconde position avec 14 % des résultats. Le maraîchage et la prairie viennent ensuite avec respectivement 6 % et 5 % des résultats.

52 % des paramètres biologiques mesurés en grandes cultures et 63 % de ceux en viticulture montrent un effet similaire de l'agriculture biodynamique en comparaison à l'agriculture biologique. Des résultats similaires sont observés pour l'abondance et l'activité des microorganismes en viticulture (Reeve *et al.*, 2005). Ces auteurs expliquent que la réponse aux préparations biodynamiques dépend du potentiel initial du sol en termes de ressources en nutriments et de qualité des habitats (Reeve *et al.*, 2005 d'après Raup, 1996). Les résultats mesurés en maraîchage indiquent pour 67 % d'entre eux un effet améliorant de l'agriculture biodynamique, ce qui est aussi le cas en prairie. Cependant, les résultats obtenus en maraîchage, viticulture et prairie manquent de généralité avec seulement quatre références. Les systèmes en arboriculture ne sont pas référencés.

Comparaison des modes de production agriculture conventionnelle et agriculture de conservation des sols

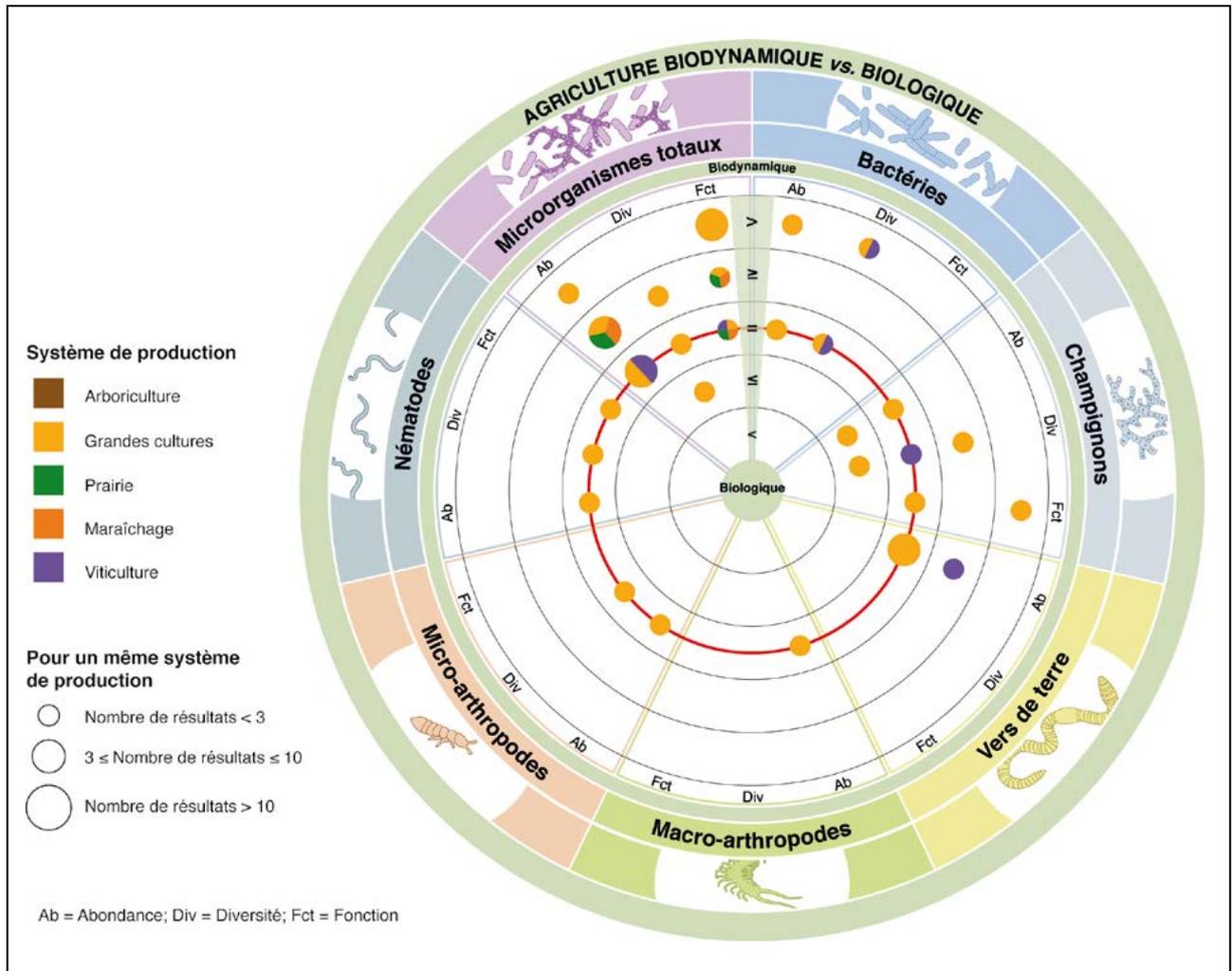
Bilan écologique pour tous les systèmes de production

L'ensemble des résultats sur les paramètres biologiques obtenus pour la comparaison conventionnel (cercle intérieur) et agriculture de conservation des sols (cercle extérieur) est présenté sous la forme d'une figure synthétique (*figure 10*).

Les résultats, obtenus à partir de seulement 3 articles référencés, concernent principalement les organismes de la

Figure 9 : Comparaison des effets de l’agriculture biologique et de l’agriculture biodynamique sur les paramètres biologiques du sol – abondance (Ab), diversité (Div) et fonction (Fct) – des différents organismes du sol : microorganismes totaux, bactéries, champignons, vers de terre, macro-arthropodes, micro-arthropodes, nématodes. Les résultats des études montrant des effets similaires des deux modes de production sont indiqués par des cercles sur la ligne rouge médiane (signe =). Les cercles placés au-dessus (en dessous) de la ligne médiane rouge indiquent les résultats des études montrant un effet positif (négatif) de l’agriculture biodynamique par rapport à la référence, l’agriculture biologique. Plus le cercle est éloigné de la ligne médiane, plus le résultat est significatif. La taille des cercles indique le nombre de mesures qui montre un même effet pour un même système de production. La couleur du cercle indique le système de production.

Figure 9: Comparative effects of the organic and biodynamic farming systems on the soil biological parameters - abundance (Ab), diversity (Div) et fonction (Fct) - of the different soil organisms: total microorganisms, bacteria, fungi, earthworms, macro-arthropods, micro-arthropods, nematodes. The results of the studies showing similar effects of the two farming systems are indicated by circles on the median red line (= sign). Circles placed above (or below) the median red line indicates the results of the studies showing a positive (or negative) effect of biodynamic farming compared with the reference organic farming. The further the circles are from the median line, the more significant are the results. The size of the circle indicates the number of measurements that showed the same effect for the same cropping system. The color of the circle specifies cropping systems.



macrofaune et de la mésofaune. Les groupes des nématodes et des micro-arthropodes sont les plus représentés avec respectivement 28 % et 24 % des résultats. Les macro-arthropodes viennent en troisième position avec 19 % des résultats. Les vers de terre comptent pour 14 % des résultats. Les groupes des microorganismes totaux, des bactéries et des champignons sont minoritaires avec chacun un même nombre de résultats qui est de 5 % du total.

Les résultats obtenus pour les organismes de la macrofaune et de la mésofaune indiquent un effet positif de l'agriculture de conservation des sols en comparaison au mode de production conventionnel pour 57 % d'entre eux. Au regard du nombre trop faible d'études et de résultats disponibles, il n'est pas possible de conclure sur une aggradation significative des mesures avec l'agriculture de conservation des sols. Toutefois, il convient de remarquer que des résultats indiquant des effets significativement positifs de l'agriculture de conservation des sols par rapport à l'agriculture conventionnelle sont démontrés pour neuf paramètres biologiques (figure 10) alors qu'un seul paramètre biologique (diversité des nématodes) indique un effet négatif.

Bilan écologique en fonction des systèmes de production

Les seuls travaux disponibles concernent les grandes cultures. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les pratiques culturales mises en œuvre en agriculture de conservation des sols (rotation diversifiée, couverture du sol et travail du sol simplifié) sont plus adaptées à ce système de production. Le maraîchage, qui pourrait tendre vers des pratiques culturales de l'agriculture de conservation des sols, ne fait pas l'objet de travaux de recherche à ce jour.

HIÉRARCHIE DES MODES DE PRODUCTION

Cette méta-analyse bibliographique permet de proposer une hiérarchie des modes de production en fonction de leur impact positif en termes de préservation, voire d'amélioration de la qualité écologique du sol :

agriculture biodynamique > agriculture biologique
 ≥ agriculture de conservation des sols
 > agriculture conventionnelle

L'agriculture biodynamique apparaît comme le mode de production ayant l'effet le plus favorable sur la qualité écologique du sol. Les résultats de la synthèse montrent que 70 % des indicateurs biologiques mesurés en agriculture biodynamique sont supérieurs à ceux de l'agriculture conventionnelle et 52 % des indicateurs microbiens sont supérieurs à ceux de l'agriculture biologique. L'agriculture biologique se positionne à la seconde

place avec 69 % de paramètres biologiques supérieurs à ceux de l'agriculture conventionnelle. L'agriculture de conservation des sols occuperait la troisième place puisque 57 % des indicateurs biologiques montrent un effet plus favorable que celui de l'agriculture conventionnelle. Cependant, ce dernier résultat manque de généralité en raison du peu de références obtenues pour l'agriculture de conservation des sols.

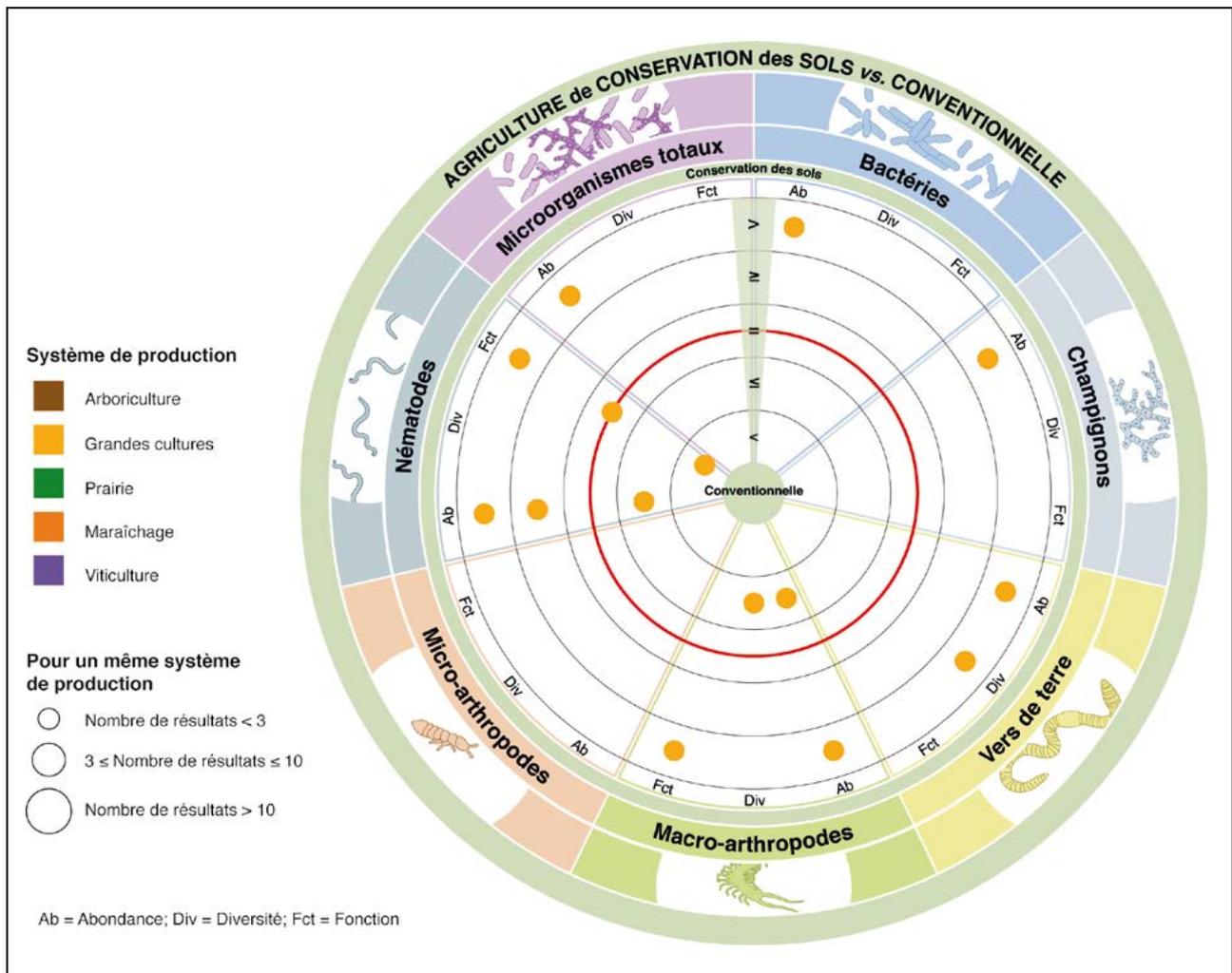
Quelles pratiques pour quel impact ?

Les différences observées entre les effets des modes de production agriculture biodynamique, agriculture biologique, agriculture de conservation des sols et agriculture conventionnelle peuvent être expliquées par les pratiques culturales spécifiques à chaque mode de production. L'agriculture biodynamique ressort de cette synthèse comme le mode de production le plus vertueux pour la qualité écologique du sol. Ceci peut s'expliquer par ses pratiques de fertilisation organique, de protection des cultures sans pesticides de synthèse, d'assolement diversifié et de simplification du travail du sol qui sont reconnues comme bénéfiques pour les organismes du sol. Ainsi, la fertilisation avec des amendements organiques (composts, fumiers de ferme, résidus de culture) contribue à améliorer la qualité microbiologique du sol en stimulant notamment les microorganismes hétérotrophes, dépendants du carbone organique pour leur développement (Chen *et al.*, 2016; Saison *et al.*, 2006; Wada et Toyota, 2006). Plusieurs auteurs ont montré que l'utilisation de fumier de ferme est positivement corrélée à l'abondance et à l'activité des microorganismes (Bobul'ská, 2015; Maharjan, 2017; Sihi, 2017; Kuht, 2019). Le fumier de ferme a aussi un effet sur la diversité des communautés microbiennes en augmentant la richesse mais en diminuant l'équilibre entre les populations (Hartmann, 2015).

L'absence d'utilisation de produits phytopharmaceutiques serait également favorable à la qualité écologique du sol car ils peuvent être toxiques pour les organismes (Pelosi *et al.*, 2013; Bünemann *et al.*, 2018) ou altérer les conditions abiotiques et les habitats (Wardle *et al.*, 2001). L'allongement de la rotation culturale, en augmentant la diversité végétale, contribuerait à une meilleure fourniture d'habitats et de ressources trophiques pour les organismes du sol (Riley *et al.*, 2008). Dans une revue, Mc Daniel *et al.* ont montré que les concentrations en C et N du sol ainsi que la biomasse microbienne augmentaient avec la diversification de la rotation (Mc Daniel *et al.*, 2014). La simplification du travail du sol pourrait également contribuer à l'amélioration de la qualité écologique du sol en agriculture biodynamique (Burns *et al.*, 2016) via la préservation de l'intégrité des organismes eux-mêmes, mais aussi des habitats du sol. Toutefois, pour ce qui est des préparations propres à la biodynamie (500p et 501 et tisanes), il n'y a actuellement pas de démonstration consensuelle de leur potentiel effet positif sur la qualité écologique du sol par manque d'études sur ce sujet (Chalker-Scott, 2013).

Figure 10 : Comparaison des effets de l'agriculture de conservation des sols et de l'agriculture conventionnelle sur les paramètres biologiques du sol – abondance (Ab), diversité (Div) et fonction (Fct) – des différents organismes du sol : microorganismes totaux, bactéries, champignons, vers de terre, macro-arthropodes, micro-arthropodes, nématodes. Les résultats des études montrant des effets similaires des deux modes de production sont indiqués par des cercles sur la ligne rouge médiane (signe =). Les cercles placés au-dessus (en dessous) de la ligne médiane rouge indiquent les résultats des études montrant un effet positif (négatif) de l'agriculture de conservation des sols par rapport à la référence, l'agriculture conventionnelle. Plus le cercle est éloigné de la ligne médiane, plus le résultat est significatif. La taille des cercles indique le nombre de mesures qui montre un même effet pour un même système de production. La couleur du cercle indique le système de production.

Figure 10: Comparative effects of the conventional et soil conservation farming systems on the soil biological parameters - abundance (Ab), diversity (Div) and function (Fct) - of the different soil organisms: total microorganisms, bacteria, fungi, earthworms, macro-arthropods, micro-arthropods, nematodes. The results of the studies showing similar effects of the two farming systems are indicated by circles on the median red line (= sign). Circles placed above (or below) the median red line indicate the results of the studies showing a positive (or negative) effect of soil conservation farming compared with the reference conventional farming. The further the circles are from the median line, the more significant the result. The size of the circle indicates the number of measurements that showed the same effect for the same cropping system. The color of the circle specifies cropping systems.



Le travail du sol en agriculture biologique, généralement plus intensif qu'en agriculture biodynamique, pourrait expliquer que l'agriculture biologique soit moins vertueuse pour la qualité écologique du sol que l'agriculture biodynamique (Robertson *et al.*, 2014). Certains auteurs s'accordent à dire que les perturbations induites par le travail du sol en agriculture biologique génèrent un environnement instable et donc stressant pour les organismes du sol (Mazzoncini *et al.*, 2010; Henneron *et al.*, 2015). Les bénéfices qui résultent de l'agriculture biologique sur la qualité écologique du sol avec la réduction des intrants de synthèse et le recours à la fertilisation organique pourraient même être masqués par l'impact du travail du sol (Gottshall *et al.*, 2017) et les apports historiques en cuivre (Karimi *et al.*, 2021).

L'agriculture conventionnelle présente le bilan le plus défavorable en termes d'impact sur la qualité écologique du sol. Dans d'autres revues, focalisées sur la comparaison de l'agriculture conventionnelle et de l'agriculture biologique, l'agriculture conventionnelle montre également une plus faible qualité écologique du sol (Bengtsson, 2005; Lori, 2017). Ceci indique que les pratiques de fertilisation minérale et de protection des cultures, bien que plus raisonnées depuis les années 2000, impactent encore significativement la qualité écologique du sol. De même, le travail du sol encore trop intense, combiné à l'absence encore fréquente de couverture du sol et la pratique de la monoculture ou de la rotation courte sont autant de pratiques démontrées très délétères pour la biodiversité des sols (Marschner *et al.*, 2004; Bünemann *et al.*, 2006; Pelosi *et al.*, 2013; Le Guillou *et al.*, 2019).

Les effets positifs de l'agriculture de conservation des sols sur la qualité écologique du sol pourraient principalement s'expliquer par la combinaison de deux pratiques culturales : l'absence de travail du sol associée à la présence d'un couvert. Celles-ci contribueraient à une amélioration de la teneur en matière organique et au développement de conditions microclimatiques en surface bénéfiques pour les organismes du sol (Henneron *et al.*, 2015). Il est délicat de positionner l'agriculture de conservation des sols dans la hiérarchie des modes de production établie grâce à ce travail de synthèse en raison d'un nombre de références trop limité dans la littérature. Sur la base des connaissances actuelles de l'impact des pratiques, l'hypothèse peut toutefois être faite que l'agriculture de conservation des sols pourrait avoir une position équivalente à celle de l'agriculture biologique car les pratiques de travail du sol simplifiées, qui manquent à l'agriculture biologique, pourraient compenser les effets délétères des pratiques de protection des cultures (emploi des pesticides et herbicides de synthèse) et de fertilisation minérale. L'émergence de travaux récents sur les effets d'une combinaison de l'agriculture de conservation des sols et de l'agriculture biologique traduit l'intérêt des pratiques de l'agriculture de conservation des sols pour la vie du sol (Vincent-Caboud *et al.*, 2017; Massaccesi *et al.*, 2020). Le fait d'associer l'absence de travail du sol, l'allongement de la rotation et l'interdiction des intrants issus de la chimie de synthèse serait probablement plus

vertueux pour la qualité écologique du sol que ne le sont indépendamment l'agriculture de conservation des sols ou l'agriculture biologique.

BILAN ET PISTES DE RECHERCHE

Cette synthèse permet pour la première fois de démontrer que les modes de production agricole ont un impact différent sur la qualité écologique des sols et, à ce titre, de les hiérarchiser. L'agriculture biodynamique apparaît ainsi comme le mode de production le plus favorable à la qualité écologique du sol. L'agriculture biologique et l'agriculture de conservation des sols, meilleurs que l'agriculture conventionnelle, seraient encore perfectibles, notamment par une combinaison innovante des pratiques vertueuses de chacun de ces modes de production.

Malgré un effort croissant de recherche depuis le début des années 2000, le nombre de publications dans la littérature internationale reste faible au regard de l'importance de la question de l'impact des modes de production agricole sur la qualité écologique des sols agricoles. Ceci peut s'expliquer en partie par des freins techniques qui ont longtemps limité l'analyse de l'abondance et de la diversité des organismes du sol. Les progrès récents dans ce domaine ont conduit au développement d'outils pour mesurer ces paramètres biologiques. Ceux-ci sont aujourd'hui considérés comme des indicateurs opérationnels à même de rendre un diagnostic de la qualité écologique du sol.

Mener de nouveaux travaux de recherche sur cette problématique, en intégrant les nouveaux indicateurs de la qualité des sols, une grande diversité pédoclimatique et l'ensemble des modes de production agricole permettrait de confirmer les tendances observées dans cette synthèse avec plus de robustesse et de généralité. À ce titre, quatre pistes se dégagent plus particulièrement pour combler les manques de connaissances de thématiques orphelines ou à consolider :

- La recherche scientifique doit investiguer l'agriculture de conservation des sols. Il serait en particulier important d'évaluer de façon systémique l'agriculture de conservation des sols, qui est aujourd'hui évaluée trop souvent sous le seul prisme de la réduction du travail du sol.
- Les connaissances sur l'agriculture biologique et l'agriculture biodynamique sont à consolider. Certaines pratiques comme un travail du sol réduit et la fertilisation organique peuvent expliquer le bilan positif de l'agriculture biodynamique sur la qualité écologique du sol. Toutefois, l'effet d'autres pratiques plus difficiles à appréhender, notamment celui des préparations biodynamiques ou de la technicité des praticiens, ou encore l'influence du calendrier d'application des pratiques, restent encore à démontrer. Quant à l'agriculture biologique, des travaux sont encore nécessaires pour augmenter la généralité des conclusions sur l'impact de ce mode de production sur la qualité écologique du sol et pour affiner les interprétations en

termes de pratiques culturales et de temps de conversion. La dépendance de ce mode de production vis-à-vis du travail du sol le rend encore perfectible en termes d'impacts pour la qualité écologique du sol. Il serait donc pertinent d'étudier aussi les effets d'un mode de production défini à partir de la combinaison des principes de l'agriculture biologique et de l'agriculture de conservation des sols pour vérifier si une meilleure combinaison de pratiques dites vertueuses peut entraîner une meilleure qualité écologique des sols.

- Les travaux de recherche sur les effets des modes de production agricole sur la qualité écologique du sol devraient être davantage répartis entre les différents systèmes de production. La dominance de travaux sur les systèmes en grandes cultures peut s'expliquer par l'importance des surfaces en jeu ou encore par le fait que certains modes de production (ACS) semblent plus appropriés pour ce système. La transition agroécologique doit toutefois s'opérer pour l'ensemble des systèmes et un effort doit être fait pour acquérir de la connaissance sur les autres systèmes de production (viticulture, maraîchage, arboriculture...).
- Cette synthèse montre que la grande majorité des outils de diagnostic utilisés pour évaluer l'impact du mode de production sur la qualité écologique du sol cible principalement des paramètres microbiens (abondance, diversité et activité des communautés microbiennes du sol). Cela démontre donc un manque de travaux, et donc de données sur les organismes de la faune du sol. Les outils pour les caractériser existent pourtant et sont de plus en plus opérationnels et devraient donc être plus systématiquement mobilisés pour acquérir une vision plus holistique de la qualité écologique du sol et de l'impact des modes de production agricole.

Même si cette première synthèse fournit déjà certaines conclusions robustes sur l'impact des différents modes de production agricole sur la qualité écologique du sol, les connaissances apportées par la mise en œuvre de ces différentes pistes permettront d'en augmenter la généralité. Que ce soient les agriculteurs, le développement agricole ou les politiques publiques, tous ces acteurs pourront alors bénéficier de ces connaissances pour orienter à long terme et à grande échelle la production agricole sur la voie de la transition agroécologique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Alexandrine Thore pour son aide précieuse pour la conception des figures 1, 7, 8, 9 et 10. Ce travail a été financé par le ministère chargé de l'agriculture et de l'alimentation.

BIBLIOGRAPHIQUE

- Alvarez T., Frampton G., Goulson D., 2001 - Epigeic Collembola in winter wheat under organic, integrated and conventional farm management regimes. *Agric Ecosyst Environ* 83:95–110. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00195-X)
- Amaral H.F., Sena J.O.A., Schwan-Estrada K.R.F., Balota E.L., Andrade D.S., 2011 - Alterações nas propriedades químicas e microbianas de solos cultivados com videiras sob manejo orgânico e convencional no sul do Brasil. *Rev Bras Ciênc Solo* 35:1517–1526. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500006>
- Anderson T.-H., Paulsen H.M., 2016 - Response time of soil microbial biomass after conversion from conventional to several different organic farming systems. *Landbauforsch - Appl Agric For Res* 258–271. <https://doi.org/10.3220/LBF1479196953000>
- Anyango J.J., Bautze D., Fiaboe K.K.M., Lagat Z.O., Muriuki A.W., Stöckli S., Riedel J., Onyambu K.G., Musyoka W.M., Karanja N.E., Adamtey N., 2020 - The impact of conventional and organic farming on soil biodiversity conservation: a case study on termites in the long-term farming systems comparison trials in Kenya. *BMC Ecol* 20:13. <https://doi.org/10.1186/s12898-020-00282-x>
- Araujo A., Leite L., Santos V., Carneiro R.F.V., 2009 - Soil Microbial Activity in Conventional and Organic Agricultural Systems. *Sustainability* 1:268–276. <https://doi.org/10.3390/su1020268>
- Araujo A., Santos V.B., Monteiro R.T., 2008 - Responses of soil microbial biomass and activity for practices of organic and conventional farming systems in Piauí state, Brazil. *Eur J Soil Biol* 44:225–230. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.06.001>
- Armalytė J., Skerniškytė J., Bakienė E., Krasauskas R., Siugzdinienė R., Kareivienė V., Klimienė I., Sužiedėlienė E., Ružauskas M., 2019 - Microbial Diversity and Antimicrobial Resistance Profile in Microbiota From Soils of Conventional and Organic Farming Systems. *Front Microbiol* 10:892. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00892>
- Banerjee S., Walder F., Büchi L., Meyer M., Held Y.A., Gattinger A., Keller T., Charles R., van der Heijden G.A.M., 2019 - Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. *ISME J* 13:1722–1736. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0383-2>
- Bardgett R., Mcalister E., 1999 - The measurement of soil fungal:bacterial biomass ratios as an indicator of ecosystem self-regulation in temperate meadow grasslands. *Biol Fertil Soils* 29:282–290. <https://doi.org/10.1007/s003740050554>
- Bardgett R.D., van der Putten W.H., 2014 - Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515:505–511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>
- Barrios E., 2007 - Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecol Econ* 64:269–285. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>
- Bedini S., Avio L., Sbrana C., Turrini A., Migliorini P., Vazzana C., Giovannetti M., 2013 - Mycorrhizal activity and diversity in a long-term organic Mediterranean agroecosystem. *Biol Fertil Soils* 49:781–790. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0770-6>
- Bending G., Turner M., Rayns F., Marx M.C., Wood M., 2004 - Microbial and Biochemical Soil Quality Indicators and Their Potential for Differentiating Areas under Contrasting Agricultural Management Regimes. *Soil Biol Biochem* 36:1785–1792. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.04.035>
- Bengtsson J., Ahnström J., Weibull A.-C., 2005 - The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: A meta-analysis. *J Appl Ecol* 42:261–269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01005.x>
- Benković-Lačić T., Brmez M., Pribetić Đ., Grubišić D., Benković R., 2016 - Biological diversity of nematode communities in conventional and organic olive farming. *Appl Ecol Environ Res* 14:457–462. https://doi.org/10.15666/aeer/1402_457462

- Berkelmans R., Ferris H., Tenuta M., Van Bruggen A.H.C., 2003 - Effects of long-term crop management on nematode trophic levels other than plant feeders disappear after 1 year of disruptive soil management. *Appl Soil Ecol* 23:223–235. [https://doi.org/10.1016/s0929-1393\(03\)00047-7](https://doi.org/10.1016/s0929-1393(03)00047-7)
- Birkhofer K., Bezemer T.M., Bloem J., Bonkowski M., Christensen S., Dubois D., Ekelund F., Fliessbach A., Gunst L., Hedlund K., Mäder P., Mikola J., Robin C., Setälä H., Tatin-Froux F., van der Putten W.H., Scheu S., 2008 - Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biol Biochem* 40:2297–2308. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.007>
- Bispo A., Grand C., Galsomies L., 2009 - Le programme ADEME "Bioindicateurs de la qualité des sols": vers le développement et la validation d'indicateurs biologiques pour la protection des sols. *Etude Gest Sols* 16:145–158
- Bispo A., Schnebelen N., 2018 - Synthèse des outils, indicateurs, référentiels disponibles pour comprendre et piloter la biologie des sols. *Innovations Agronomiques INRAE* 69: 91-100
- Blanchart E., Trap J., 2020 - Intensifier les fonctions écologiques du sol pour fournir durablement des services écosystémiques en agriculture. *Etude Gest Sols* 27: 121-134
- Bobul'ská L., Fazekašová D., Angelovičová L., Kotorová D., 2015 - Impact of ecological and conventional farming systems on chemical and biological soil quality indices in a cold mountain climate in Slovakia. *Biol Agric Hortic* 31:205–218. <https://doi.org/10.1080/01448765.2014.1002537>
- Boeraeve F., Dendoncker N., Cornélis J.-T., Degruene F., Dufreñe M., 2020 - Contribution of agroecological farming systems to the delivery of ecosystem services. *J Environ Manage* 260:109576. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109576>
- Bouché M., 1972 - Lombriciens de France. *Ecologie et Systématique*, Ann Zool Ecol Anim.
- Bouchez T., Bliex A.L., Dequiedt S., Domaizon I., Dufresne A., Ferreira S., Godon J.J., Hellal J., Joulain C., Quaiser A., Martin-Laurent F., Mauffret A., Monier J.M., Peyret P., Schmitt-Koplin P., Sibourg O., D'oiron E., Bispo A., Deportes I., Grand C., Cuny P., Maron P.-A., Ranjard L., 2016 - Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. *Environ Chem Lett* 14:423–441. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0581-3>
- Briar S., Grewal P., Somasekhar N., Stinner D., Miller A.S., 2007 - Soil nematode community, organic matter, microbial biomass and nitrogen dynamics in field plots transitioning from conventional to organic management. *Appl Soil Ecol - APPL SOIL ECOL* 37:256–266. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.08.004>
- Brussaard L., Caron P., Campbell B.M., Lipper L., Mainka S., Rabbinge R., Babin D., Pulleman M., 2010 - Reconciling biodiversity conservation and food security: Scientific challenges for a new agriculture. *Curr Opin Environ Sustain* 2:34–42. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.03.007>
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer E.R., De Deyn G., de Goede R., Flesskens L., Geissen V., Kuyper W.T., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L., 2018 - Soil quality – A critical review. *Soil Biol Biochem* 120:105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Bünemann E.K., Schwenke G.D., Van Zwieten L., 2006 - Impact of agricultural inputs on soil organisms—a review. *Soil Res* 44:379. <https://doi.org/10.1071/sr05125>
- Burger M., Jackson L.E., Lundquist E.J., Louie T.D., Miller L.R., Rolston E.D., Scow K., 2005 - Microbial responses and nitrous oxide emissions during wetting and drying of organically and conventionally managed soil under tomatoes. *Biol Fertil Soils* 42:109–118. <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0007-z>
- Burgio G., Campanelli G., Leteo F., Ramilli F., Depalo L., Fabbri R., Sgolastra F., 2015 - Ecological Sustainability of an Organic Four-Year Vegetable Rotation System: Carabids and Other Soil Arthropods as Bioindicators. *Agroecol Sustain Food Syst* 39:295–316. <https://doi.org/10.1080/21683565.2014.981910>
- Burkitt L., Small D., McDonald J., Wales B., Jenkin M.L., 2007 - Comparing irrigated biodynamic and conventionally managed dairy farms. 1. Soil and pasture properties. *Aust J Exp Agric - AUST J EXP AGR* 47:479–488. <https://doi.org/10.1071/EA05196>
- Burns K.N., Bokulich N.A., Cantu D., Greenhut F.R., Kluepfel A.D., O'Geen A.T., Strauss L.S., Steenwerth L.K., 2016 - Vineyard soil bacterial diversity and composition revealed by 16S rRNA genes: Differentiation by vineyard management. *Soil Biol Biochem* 103:337–348. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.09.007>
- Campos-Herrera R., Goez-Ros J., Escuer M., Cuadra L., Barrios L., Gutierrez C., 2008 - Diversity, occurrence, and life characteristics of natural entomopathogenic nematode populations from La Rioja (Northern Spain) under different agricultural management and their relationships with soil factors. *Soil Biol Biochem* 40:1474. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.002>
- Cardelli R., Levi-Minzi R., Saviozzi A., Riffaldi R., 2005 - Organically and Conventionally Managed Soils: Biochemical Characteristics. *J Sustain Agric* 25:63–74. https://doi.org/10.1300/J064v25n02_06
- Carpenter-Boggs L., Kennedy A.C., Reganold J.P., 2000a - Organic and biodynamic management: effects on soil biology. *Soil Sci Soc Am J* 64:1651–1659
- Carpenter-Boggs L., Reganold J.P., Kennedy A.C., 2000b - Biodynamic preparations: short-term effects on crops, soils, and weed populations. *Am J Altern Agric* 15:110–118
- Castillo X., Joergensen R.G., 2001 - Impact of ecological and conventional arable management systems on chemical and biological soil quality indices in Nicaragua. *Soil Biol Biochem* 33:1591–1597. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00089-X)
- Chalker-Scott L., 2013 - The Science Behind Biodynamic Preparations: A Literature Review. *HortTechnology* 23:814–819. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.23.6.814>
- Chavarria D., Pérez-Brandan C., Serri D., Meriles M.J., Restovich B.S., Andriulo E.A., Jacquelin L., Vargas-Gil S., 2018 - Response of soil microbial communities to agroecological versus conventional systems of extensive agriculture. *Agric Ecosyst Environ* 264:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.008>
- Chen C., Zhang J., Lu M., Qin C., Chen Y., Yang L., Huang Q., Jichen W., Shen Z.G., Shen Q., 2016 - Microbial communities of an arable soil treated for 8 years with organic and inorganic fertilizers. *Biol Fertil Soils* 52:455–467. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1089-5>
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Maitelle T., Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A., Pérès G., 2012 - Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *Eur J Soil Biol* 49:63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.003>
- Coll P., Le Cadre E., Villenave C., 2012 - How are nematode communities affected during a conversion from conventional to organic farming in southern French vineyards? *Nematology* 16(PART6):665–676. <https://doi.org/10.1163/156854112X624195>
- Coll P., Le Cadre E., Blanchart E., Hinsinger P., Villenave C., 2011 - Organic viticulture and soil quality: A long-term study in Southern France. *Appl Soil Ecol - APPL SOIL ECOL* 50:37–44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.013>
- Cookson W., Marschner P., Clark I., Milton N., Smirk M., Murphy V.D., Osman M., Stockdale E., Hirsch R.P., 2006 - The influence of season, agricultural management, and soil properties on gross nitrogen transformations and bacterial community structure. *Aust J Soil Res - AUST J SOIL RES* 44. <https://doi.org/10.1071/SR05042>
- Cortet J., Hedde M., 2020 - La faune du sol pour évaluer l'impact des pratiques agricoles et la santé des sols. *Techniques de l'Ingénieur*. GE1058v1

- Cortet J., Vauflery A.G.-D., Poinso-Balaguer N., Gomot L., Texier C., Cluzeau D., 1999 - The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects. *Eur J Soil Biol* 35:115–134. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(00\)00116-3](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(00)00116-3)
- Crecchio C., Gelsomino A., Ambrosoli R., Minati J.L., Ruggiero P., 2004 - Functional and molecular responses of soil microbial communities under differing soil management practices. *Soil Biol Biochem* 36:1873–1883. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.05.008>
- Crittenden S.J., De Goede R.G.M., 2016 - Integrating soil physical and biological properties in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. *Eur J Soil Biol* 77:26–33. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.09.003>
- Demeter international (2020). Production, Processing and Labelling International Standard for the use and certification of Demeter, Biodynamic and related trademarks (As of: July 2020/1st circulation). Available via <https://www.demeter.net/certification/standards/>. Accessed 20 Oct 2020
- Dequiedt S., Thioulouse J., Jolivet C., Saby N.P.A., Lelievre M., Maron P.-A., Martin P.M., Chemidlin Prévost-Bouré N., Toutain B., Arrouays D., Lemanceau P., Ranjard L., 2009 - Biogeographical patterns of soil bacterial communities. *Environ Microbiol Rep* 1:251–255. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00040.x>
- Diekötter T., Wamser S., Wolters V., Birkhofer K., 2010 - Landscape and management effects on structure and function of soil arthropod communities in winter wheat. *Spec Sect Harvest Perenn Grassl Ecol Models Farmings Perenn Future* 137:108–112. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.008>
- Djemiel C., Terrat S., 2019 - Nouvelles techniques de méta-omiques pour le diagnostic de la qualité microbiologique des sols. *Techniques de l'Ingénieur*. GE1052v1
- Djigal D., Saj S., Rabary B., Blanchart E., Villenave C., 2012 - Mulch type affects soil biological functioning and crop yield of conservation agriculture systems in a long-term experiment in Madagascar. *Soil Tillage Res* 118:11–21. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.008>
- Esperschütz J., Gättinger A., Mäder P., Schloter M., Fliessbach A., 2007 - Response of soil microbial biomass and community structures to conventional and organic farming systems under identical crop rotations: Response of soil microbial biomass and community structures. *FEMS Microbiol Ecol* 61:26–37. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00318.x>
- FAO, 2010 - Farming for the future in Southern Africa: An introduction to conservation agriculture. REOSA Technical brief
- FAO, 2015 - Healthy soils are the basis for healthy food production. FAO, Rome, Italy.
- Ferris H., Bongers T., de Goede R.G.M., 2001 - A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Appl Soil Ecol* 18:13–29. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(01\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(01)00152-4)
- Fliessbach A., Mäder P., 2000 - Microbial biomass and size-density fractions differ between soils of organic and conventional agricultural systems. *Soil Biol Biochem* 32:757–768. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00197-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00197-2)
- Fliessbach A., Oberholzer H.-R., Gunst L., Mäder P., 2007 - Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric Ecosyst Environ* 118:273–284. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.022>
- Francis C., Lieblein G., Gliessman S., Breland T.A., Creamer N., Harwood R., Salomsson L., Helenius J., Rickerl D., Salvador R., Wiedenhoef M., Simmons S., Allen P., Altieri M.A., 2003 - Agroecology: The Ecology of Food Systems. *J Sustain Agric* 22:99–118. https://doi.org/10.1300/J064v22n03_10
- Francis C., Wezel A., 2015 - Agroecology and Agricultural Change. *Int Encycl Soc Behav Sci*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.91026-2>
- Fuller R., Norton L., Feber R., Johnson P.J., Chamberlain D.E., Joys A.C., Mathews F., Stuart R.C., Townsend M.C., Manley W.J., Wolfe M.S., Macdonald D.W., Firbank L.G., 2006 - Benefits of organic farming to biodiversity vary among taxa. *Biol Lett* 1:431–4. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2005.0357>
- Gajda A.M., Czyż E.A., Dexter A.R., 2016 - Effects of long-term use of different farming systems on some physical, chemical and microbiological parameters of soil quality. *Int Agrophysics* 30:165–172. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0081>
- Gao D., Wang F., Li J., Yu S., Li Z.A., Zhao J., 2019 - Soil nematode communities as indicators of soil health in different land use types in tropical area. *Nematology* 22:1–16. <https://doi.org/10.1163/15685411-00003325>
- García-Ruiz R., Ochoa V., Viñeola B., Hinojosa M.B., Peña-Santiago R., Liébanas G., Linares J.C., Carreira J.A., 2009 - Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: Influence of seasonality and site features. *Appl Soil Ecol* 41:305–314. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.004>
- Garnett T., Appleby M.C., Balmford A., Bateman I.J., Benton T.G., Bloomer P., Burlingame B., Dawkins M., Dolan L., Fraser D., Herrero M., Hoffmann I., Smith P., Thornton P.K., Toulmin C., Vermeulen S.J., Godfray H.C.J., 2013 - Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. *Science* 341:33–4. <https://doi.org/10.1126/science.1234485>
- Ge T., Chen X., Yuan H., Li B., Zhu H., Peng P., Li K., Jones L.D., Wu J., 2013 - Microbial biomass, activity, and community structure in horticultural soils under conventional and organic management strategies. *Eur J Soil Biol* 58:122–128. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.07.005>
- Ge T., Nie S., Wu J., Shen J., Xiao H., Tong C., Huang D., Hong Y., Iwasaki K., 2011 - Chemical properties, microbial biomass, and activity differ between soils of organic and conventional horticultural systems under greenhouse and open field management: a case study. *J Soils Sediments* 11:25–36. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0293-4>
- Gill E., 2010 - Lady Eve Balfour and the British organic food and farming movement. PhD thesis. Aberystwyth University
- Giller K.E., Witter E., Mcgrath S.P., 1998 - Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 1389–1414. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00270-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00270-8)
- Glover J.D., Reganold J.P., Andrews P.K., 2000 - Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agric Ecosyst Environ* 80:29–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00131-6)
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2010 - Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols. Presses polytechniques et universitaires romandes
- Gottshall C.B., Cooper M., Emery S.M., 2017 - Activity, diversity and function of arbuscular mycorrhizae vary with changes in agricultural management intensity. *Agric Ecosyst Environ* 241:142–149. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.011>
- Hartemink A.E., 2008 - Soils are back on the global agenda. *Soil Use Manag* 24:327–330. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00187.x>
- Hartmann M., Fliessbach A., Oberholzer H.-R., Widmer F., 2006 - Ranking the magnitude of crop and farming system effects on soil microbial biomass and genetic structure of bacterial communities. *FEMS Microbiol Ecol* 57:378–388. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00132.x>
- Hartmann M., Frey B., Mayer J., Mäder P., Widmer F., 2015 - Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *ISME J* 9:1177–1194. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.210>
- Hazell P., Wood S., 2008 - Drivers of change in global agriculture. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 363:495–515. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2166>
- Hedde M., Bispo A., Cluzeau D., Coeurdassier M., Corter J., De Vaufléury A., Guernion M., Pauget B., Ruiz N., Vandembulcke F., Villenave C., Alaphilippe A., Beguiristain T., Douay F., Faure O., Hitmi A., Houot S., Legras M., Vian J.-F., Conil S., Rougé L., Peres G., 2012 - Soil fauna used as bioindicators for soil monitoring, risk assessment and soil characterization. Results from the French national "Bioindicators Programme" XVI ICSZ - International Colloquium on Soil Zoology, Aug 2012, Coimbra, Portugal.

- Heger T.J., Straub F., Mitchell E.A.D., 2012 - Impact of farming practices on soil diatoms and testate amoebae: A pilot study in the DOK-trial at Therwil, Switzerland. *Eur J Soil Biol* 49:31–36. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.08.007>
- Hendgen M., Hoppe B., Döring J., Friedel M., Kauer R., Frisch M., Dahl A., Kellner H., 2018 - Effects of different management regimes on microbial biodiversity in vineyard soils. *Sci Rep* 8:1–13
- Henneron L., Bernard L., Hedde M., Pelosi C., Villenave C., Chenu C., Bertrand M., Girardin C., Blanchart E., 2015 - Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agron Sustain Dev* 35:169–181. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0215-8>
- Hernández E., Pérez Y., Jiménez-García D., Patrón J., 2017 - Management and Health of Three Corn Farming Systems in the Region of Llanos de San Juan, Puebla, Mexico. *Agroecol Sustain Food Syst* 41:76–97. <https://doi.org/10.1080/21683565.2016.1254707>
- Heyer W., Hülsbergen K.-J., Wittmann C., Papaja S., Christen O., 2003 - Field related organisms as possible indicators for evaluation of land use intensity. *Agric Ecosyst Environ* 98:453–461. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00104-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00104-X)
- Ilieva-Makulec K., Tyburski J., Makulec G., 2017 - Soil Nematodes in Organic and Conventional Farming System: A Comparison of the Taxonomic and Functional Diversity. *Pol J Ecol* 64:547–563. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2016.64.4.010>
- Jaffuel G., Mäder P., Blanco-Pérez R., Chririboga Morales X., Fliessbach A., Turlings T., Campos-Herrera R., 2016 - Prevalence and activity of entomopathogenic nematodes and their antagonists in soils that are subject to different agricultural practices. *Agric Ecosyst Environ* 230:329–340. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.009>
- Jeffery S., Gardi C., Jones A., Montanarella L., Marmo L., Miko L., Ritz K., Peres G., Römbke J., van der Putten W.H., 2010 - European Atlas of Soil Biodiversity. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Jones C.G., Lawton J.H., Shachak M., 1996 - Organisms as Ecosystem Engineers, in: Samson, F.B., Knopf, F.L. (Eds.), *Ecosystem Management: Selected Readings*. Springer New York, New York, NY, pp. 130–147. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4018-1_14
- Karimi B., Masson V., Guillard C., Leroy E., Pellegrinelli S., Giboulot E., Maron P.-A., Ranjard L., 2021 - La biodiversité des sols est-elle impactée par l'apport de cuivre ou son accumulation dans les sols vignes? Synthèse des connaissances scientifiques. *Etude et Gestion des Sols*, 28, 71-92
- Karimi B., Cahurel J.-Y., Gontier L., Charlier L., Chovelon M., Mahé H., Ranjard L., 2020 - A meta-analysis of the ecotoxicological impact of viticultural practices on soil biodiversity. *Environ Chem Lett*. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01050-5>
- Karimi B., Terrat S., Dequiedt S., Saby N.P.A., Horrigue W., Lelièvre M., Nowak V., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Bispo A., Maron P.A., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L., 2018 - Biogeography of soil bacteria and archaea across France. *Sci Adv* 4:eaat1808. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1808>
- Kepler R.M., Epp Schmidt D.J., Yarwood S.A., Cavigelli M.A., Reddy K.N., Duke S.O., Bradley C.A., Williams Jr.M.M., Buyer J.S., Maul J.E., 2020 - Soil Microbial Communities in Diverse Agroecosystems Exposed to the Herbicide Glyphosate. *Appl Environ Microbiol* 86:e01744-19. <https://doi.org/10.1128/AEM.01744-19>
- Kibblewhite M.G., Ritz K., Swift M.J., 2008 - Soil health in agricultural systems. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 363:685–701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Kuht J., Eremeev V., Talgre L., Alaru M., Loit E., Mäeorg E., Esmaeilzadeh-Salestani K., Luik A., 2019 - Changes in the Soil Microbial Hydrolytic Activity and the Content of Organic Carbon and Total Nitrogen by Growing Spring Barley Undersown with Red Clover in Different Farming Systems. *Agriculture* 9:146. <https://doi.org/10.3390/agriculture9070146>
- Landi S., Papini R., d'Errico G., Barzanti G.P., Roversi P.F., 2017 - Nematode indicators as integrative measures of soil condition during conversion from conventional to organic rice production in Italy: a case study. *Biol Agric Hortic* 34:141–153. <https://doi.org/10.1080/01448765.2017.1399166>
- Larsen E., Grossman J., Edgell J., Hoyt G., Osmond D.L., Hu S., 2014 - Soil biological properties, soil losses and corn yield in long-term organic and conventional farming systems. *Soil Tillage Res* 139:37–45. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.002>
- Lavelle P., Decaëns T., Aubert M., Barot S., Blouin M., Bureau F., Margerie P., Mora P., Rossi J.-P., 2006 - Soil invertebrates and ecosystem services. *Eur J Soil Biol* 42:3–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Le Guillou C., Chemidlin Prévost-Bouré N., Karimi B., Akkal-Corfini N., Dequiedt S., Nowak V., Terrat S., Menasseri-Aubry S., Viaud V., Maron P.-A., Ranjard L., 2019 - Tillage intensity and pasture in rotation effectively shape soil microbial communities at a landscape scale. *MicrobiologyOpen* 8:e00676–e00676. <https://doi.org/10.1002/mbo3.676>
- Lernoud J., Willer H., 2017 - Organic Agriculture Worldwide 2017: Current Statistics 29.
- Li R., Khafipour E., Krause D.O., Entz M.H., de Kievit T.R., Fernando W.G.D., 2012 - Pyrosequencing Reveals the Influence of Organic and Conventional Farming Systems on Bacterial Communities. *PLoS ONE* 7:e51897. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051897>
- Liu B., Tu C., Hu S., Gumpertz M., Ristaino B.J., 2007 - Effect of organic, sustainable, and conventional management strategies in grower fields on soil physical, chemical, and biological factors and the incidence of Southern blight. *Appl Soil Ecol* 37:202–214. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.06.007>
- Lori M., Symnaczyk S., Mäder P., De Deyn G., Gattinger A., 2017 - Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A meta-analysis and meta-regression. *PLOS ONE* 12:e0180442. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180442>
- Lupatini M., Korthals G.W., de Hollander M., Janssens T.K.S., Kuramae E.E., 2017 - Soil Microbiome Is More Heterogeneous in Organic Than in Conventional Farming System. *Front Microbiol* 7:2064. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02064>
- Mäder P., Edenhofer S., Boller T., Wiemken A., Niggli U., 2000 - Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation. *Biol Fertil Soils* 31:150–156. <https://doi.org/10.1007/s003740050638>
- Mäder P., Fliessbach A., Dubois D., Gunst L., Fried P., Niggli U., 2002 - Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296:1694–1697
- Maharjan M., Sanaulah M., Razavi B.S., Kuzyakov Y., 2017 - Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils. *Appl Soil Ecol* 113:22–28. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.008>
- Marinari S., Roberto M., Campiglia E., Grego S., 2006 - Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecol Indic* 6:701–711. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.08.029>
- Maron P.-A., Ranjard L., Mougel C., Lemanceau P., 2007 - Metaproteomics: A New Approach for Studying Functional Microbial Ecology. *Microb. Ecol.* 53, 486–93. <https://doi.org/10.1007/s00248-006-9196-8>
- Maron P.-A., Ranjard L., 2019 - Qualité écologique des sols. *Techniques de l'Ingénieur*. GE1051v1
- Marschner P., Crowley D., Ching Yang H., 2004 - Development of specific rhizosphere bacterial communities in relation to plant species, nutrition and soil type. *Plant Soil* 261:199–208. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000035569.80747.c5>

- Massaccesi L., Rondoni G., Tosti G., Conti E., Guiducci M., Agnelli A., 2020 - Data on soil physicochemical properties and biodiversity from conventional, organic and organic mulch-based cropping systems. *Data Brief* 31:105718. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105718>
- Mazzoncini M., Canali S., Giovannetti M., Castagnoli M., Tittarelli F., Antichi D., Nannelli R., Cristani C., Bárberi P., 2010 - Comparison of organic and conventional stockless arable systems: A multidisciplinary approach to soil quality evaluation. *Appl Soil Ecol* 44:124–132. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.11.001>
- McBratney A., Field D.J., Koch A., 2014 - The dimensions of soil security. *Geoderma* 213:203–213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>
- McDaniel M.D., Tiemann L.K., Grandy A.S., 2014 - Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecol. Appl.* 24, 560–570. <https://doi.org/10.1890/13-0616.1>
- Meissner G., Athmann M., Fritz J., Kauer R., Stoll M., Reiner Schulz H., 2019 - Conversion to organic and biodynamic viticultural practices: impact on soil, grapevine development and grape quality. *Oeno One* 53:639–659
- Melero S., Porras J.C.R., Herencia J.F., Madejon E., 2006 - Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management. *Soil Tillage Res* 90:162–170. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.016>
- Moeskops B., Buchan D., Sukristiyonubowo, De Neve S., De Gussemé B., Widowati L.R., Setyorini D., Sleutel S., 2012 - Soil quality indicators for intensive vegetable production systems in Java, Indonesia. *Ecol Indic* 18:218–226. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.011>
- Moeskops B., Sukristiyonubowo, Buchan D., Sleutel S., Herawaty L., Husen E., Saraswati R., Setyorini D., De Neve S., 2010 - Soil microbial communities and activities under intensive organic and conventional vegetable farming in West Java, Indonesia. *Appl Soil Ecol* 45:112–120. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.03.005>
- Morrison-Whittle P., Lee S., Goddard M., 2017 - Fungal communities are differentially affected by conventional and biodynamic agricultural management approaches in vineyard ecosystems. *Agric Ecosyst Environ* 246:306–313. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.022>
- Moura G.S., Franzener G., 2017 - Biodiversity of nematodes biological indicators of soil quality in the agroecosystems. *Arq Inst Biológico* 84:1-8 e0142015. <https://doi.org/10.1590/1808-1657000142015>
- Mulder C., Boit A., Bonkowski M., De Ruyter P.C., Mancinelli G., Van der Heijden M.G.A., Van Wijnen H.J., Vonk J.A., Rutgers M., 2011 - A Belowground Perspective on Dutch Agroecosystems: How Soil Organisms Interact to Support Ecosystem Services. In: Woodward G (ed) *Advances in Ecological Research*. Academic Press, pp 277–357
- Mulder C., Zwart D., Wijnen H., Schouten A.J., Breure A.M., 2003 - Observational and simulated evidence of ecological shifts within the soil nematode community of agroecosystems under conventional and organic farming. *Funct Ecol* 17:516–525. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2003.00755.x>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1458-2>
- Okur N., Çengel M., Göçmez S., Hüsnü H., 2009 - Microbial biomass and enzyme activity in vineyard soils under organic and conventional farming systems. *Turk J Agric For* 33: 413-423. <https://doi.org/10.3906/tar-0806-23>
- Parfitt R.L., Yeates G.W., Ross D.J., Mackay A.D., Budding P.J., 2005 - Relationships between soil biota, nitrogen and phosphorus availability, and pasture growth under organic and conventional management. *Appl Soil Ecol* 28:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.07.001>
- Paul J., 2011 - Attending the First Organic Agriculture Course: Rudolf Steiner's Agriculture Course at Koberwitz, 1924. *Eur J Soc Sci – Vol Number* 21.
- Peigné J., Lefevre V., Vian J.F., Fleury P., 2015 - Conservation Agriculture in Organic Farming: Experiences, Challenges and Opportunities in Europe. *Conserv Agric* 559–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4_21
- Pelosi C., Bertrand M., Thénard J., Mougin C., 2015 - Earthworms in a 15 years agricultural trial. *Appl Soil Ecol* 88:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.12.004>
- Pelosi C., Toutous L., Chiron F., Dubs F., Hedde M., Muratet A., Ponge J.F., Salmon S., Makowski D., 2013 - Reduction of pesticide use can increase earthworm populations in wheat crops in a European temperate region. *Agric Ecosyst Environ* 181:223–230. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.003>
- Probst B., Schüller C., Joergensen R., 2007 - Vineyard soils under organic and conventional management - microbial biomass and activity indices and their relation to soil chemical properties. *Biol Fertil Soils* 44:443–450. <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0225-7>
- Quist C.W., Schrama M., De Haan J.J., Smant G., Bakker J., van der Putten W.H., Helder J., 2016 - Organic farming practices result in compositional shifts in nematode communities that exceed crop-related changes. *Appl Soil Ecol* 98:254–260. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.022>
- Regulation (EC) 2018/ du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (EC) no 834/2007. Available via <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TX/TX/HTML/?uri=CELEX:32018R0848&from=HU>. Accessed 8 Sept 2020
- Reeve J.R., Carpenter-Boggs L., Sehmsdorf H., 2011 - Sustainable Agriculture: A Case Study of a Small Lopez Island Farm. *Agric Syst* 104:572–579. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.04.006>
- Reeve J.R., Carpenter-Boggs L., Reganold J.P., York A.L., MCGourty G., McCloskey L., 2005 - Soil and winegrape quality in biodynamically and organically managed vineyards. *Am J Enol Vitic* 56:367–376
- Reeve J.R., Schadt C.W., Carpenter-Boggs L., Kang S., Zhou J., Reganold J.P., 2010 - Effects of soil type and farm management on soil ecological functional genes and microbial activities. *ISME J* 4:1099–1107. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.42>
- Reganold J.P., Andrews P.K., Reeve J.R., Carpenter-Boggs L., Schadt C.W., Alldredge J.R., Ross C.F., Davies N.M., Zhou J., 2010 - Fruit and Soil Quality of Organic and Conventional Strawberry Agroecosystems. *PLoS ONE* 5(9):e12346. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012346>
- Riley H., Pommeresche R., Eltun R., Hansen S., Korsæth A., 2008 - Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use. 124:275–284. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.11.002>
- Rillig M.C., Lehmann A., 2019 - Exploring the agricultural parameter space for crop yield and sustainability. *New Phytol* 223:517–519. <https://doi.org/10.1111/nph.15744>
- Robertson G.P., Gross K., Hamilton S., Landis D., Schmidt T.M., Snapp S., Swinton S., 2014 - Farming for Ecosystem Services: An Ecological Approach to Production Agriculture. *BioScience* 64:404–415. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu037>
- Romaniuk R., Giuffrè L., Costantini A., Nannipieri P., 2011 - Assessment of soil microbial diversity measurements as indicators of soil functioning in organic and conventional horticulture systems. *Ecol Indic* 11:1345–1353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.008>
- Saison C., Degrange V., Oliver R., Millard P., Commeaux C., Montange D., Le Roux X., 2006 - Alteration and resilience of the soil microbial community following compost amendment: effects of compost level and compost-borne microbial community. *Environ Microbiol* 8:247–257. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00892.x>
- Sánchez-Moreno S., Nicola N., Ferris H., Zalom F., 2009 - Effects of agricultural management on nematode–mite assemblages: Soil food web indices as predictors of mite community composition. *Appl Soil Ecol* 41:107–117. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.09.004>

- Santos V.B., Araújo A.S.F., Leite L.F.C., Nunes L.A.P.L., Melo W.J., 2012 - Soil microbial biomass and organic matter fractions during transition from conventional to organic farming systems. *Geoderma* 170:227–231. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.007>
- Schjonning P., Elmholt S., Munkholm L.J., Deboz K., 2002 - Soil quality aspects of humid sandy loams as influenced by organic and conventional long-term management. *Agric Ecosyst Environ* 88:195–214. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00161-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00161-X)
- Scullion J., Neal S., Philips L., 2007 - Earthworm casting and burrowing activity in conventional and organic grass-arable rotations. *Eur J Soil Biol* 43:S216–S221. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.08.018>
- Shannon D., Sen A.M., Johnson D.B., 2006 - A comparative study of the microbiology of soils managed under organic and conventional regimes. *Soil Use Manag* 18:274–283. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00269.x>
- Sihni D., Dari B., Sharma D.K., Pathak H., Nain L., Sharma O.M., 2017 - Evaluation of soil health in organic vs. conventional farming of basmati rice in North India. *J Plant Nutr Soil Sci* 180:389–406. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700128>
- Stark C.H., Condron L.M., O'Callaghan M., Stewart A., Di H.J., 2008 - Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments. *Soil Biol Biochem* 40:1352–1363. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.09.025>
- Stone D., Ritz K., Griffiths B.G., Orgiazzi A., Creamer R.E., 2016 - Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring. *Appl Soil Ecol* 97:12–22. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.005>
- Stork N., Eggleton P., 1992 - Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. *Am J Altern Agric* 7:38–47. <https://doi.org/10.1017/S0889189300004446>
- Sudhakaran M., Ramamoorthy D., Kumar S.R., 2013 - Impacts of conventional, sustainable and organic farming system on soil microbial population and soil biochemical properties, Puducherry, India. *Int J Environ Sci* 4:28–41
- Sugiyama A., Vivanco J., Jayanty S., Manter D., 2010 - Pyrosequencing assessment of soil microbial communities in organic and conventional potato farms. *Plant Dis* 94: 1329–1335. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-10-0090>
- Suja G., Byju G., Jyothi A., Veena S.S., Sreekumar J., 2017 - Yield, quality and soil health under organic vs conventional farming in taro. *Sci Hortic* 218:334–343. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.02.006>
- Surekha K., Satishkumar Y.S., 2014 - Productivity, Nutrient Balance, Soil Quality, and Sustainability of Rice (*Oryza sativa* L.) under Organic and Conventional Production Systems. *Commun Soil Sci Plant Anal* 45:415–428. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.872250>
- Thiele-Bruhn S., Bloem J., de Vries F.T., Kalbitz K., Wagg C., 2012 - Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4: 523–528. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.004>
- Tsiafouli M.A., Thébaud E., Sgardelis S.P., de Ruiter P.C., 2015 - Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Glob Chang Biol* 21: 973–985. <https://doi.org/10.1111/gcb.12752>
- Tu C., Louws F., Creamer N., Mueller J.P., Briwnie C., Fager K., Bell M., Hu S., 2006 - Responses of soil microbial biomass and N availability to transition strategies from conventional to organic farming systems. *Agric Ecosyst Environ* 113:206–215. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.09.013>
- Uddin M., Siddiqy M., Hossain M., Islam F., Halim G., Bari L., 2016 - Impact of organic and conventional practices on, soil health and crop yield under tropical and subtropical environment of Bangladesh. *IJOEAR* 2: 89–100.
- van der Putten W.H., Mudgal S., Turbe A., De Toni A., Benito P., Lavelle P., Ruiz N., Labouze E., Mudgal S., 2010 - Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. *Bio Intelligence Service, Paris*
- van Diepeningen A., Vos O., Korthals G., van Bruggen A., 2006 - Effects of organic versus conventional management on chemical and biological parameters in agricultural soils. *Appl Soil Ecol* 31: 120–135–2
- Velmourougane K., 2016 - Impact of Organic and Conventional Systems of Coffee Farming on Soil Properties and Culturable Microbial Diversity. *Scientifica* 2016:. <https://doi.org/10.1155/2016/3604026>
- Vincent-Caboud L., Peigné J., Casagrande M., Silva E.M., 2017 - Overview of Organic Cover Crop-Based No-Tillage Technique in Europe: Farmers' Practices and Research Challenges. *Agriculture* 7:42. <https://doi.org/10.3390/agriculture7050042>
- Wachter J.M., Painter K.M., Carpenter-Boggs L.A., Huggins D.R., Reganold J.P., 2019 - Productivity, economic performance, and soil quality of conventional, mixed, and organic dryland farming systems in eastern Washington State. *Agric Ecosyst Environ* 286:106665. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106665>
- Wada S., Toyota K., 2006 - Repeated applications of farmyard manure enhance resistance and resilience of soil biological functions against soil disinfection. *Biol Fertil Soils* 43:349–356. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0116-3>
- Walmesley A., Sklenička P., 2017 - Various effects of land tenure on soil biochemical parameters under organic and conventional farming – Implications for soil quality restoration. *Ecol Eng* 107:137–143. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.006>
- Wardle D.A., Yeates G.W., Bonner K.I., Nicholson K.S., Watson R.N., 2001 - Impacts of ground vegetation management strategies in a kiwifruit orchard on the composition and functioning of the soil biota. *Soil Biol Biochem* 33:893–905. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00235-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00235-2)
- Weibull A.-C., Östman Ö., Granqvist Å., 2003 - Species richness in agroecosystems: The effect of landscape, habitat and farm management. *Biodivers Conserv* 12:1335–1355. <https://doi.org/10.1023/A:1023617117780>
- Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C., 2009 - Agroecology as a science, a movement and a practice. *A review*. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 503–515. <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>
- Widmer F., Rasche F., Hartmann M., Fliessbach A., 2006 - Community structures and substrate utilization of bacteria in soils from organic and conventional farming systems of the DOK long-term field experiment. *Appl Soil Ecol* 33:294–307. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.09.007>
- Willer H., Schlatter B., Travnicek, Kemper L., Lernoud J., (Eds.) 2020 - *The World of Organic Agriculture: Statistics and Emerging Trends 2020*. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick and IFOAM - Organics International, Bonn.
- Wu T., Chellemi D., Graham J., Martin K.J., Roskopf E.N., 2008 - Comparison of Soil Bacterial Communities Under Diverse Agricultural Land Management and Crop Production Practices. *Microb Ecol* 55:293–310. <https://doi.org/10.1007/s00248-007-9276-4>
- Xue K., Wu L., Deng Y., He Z., Van Nostrand J., Robertson P.G., Schmidt T.M., Zhou J., 2013 - Functional Gene Differences in Soil Microbial Communities from Conventional, Low-Input, and Organic Farmlands. *Appl Environ Microbiol* 79:1284–1292. <https://doi.org/10.1128/AEM.03393-12>
- Yeates G.W., Ferris H., Moens T., van der Putten W.H., 2008 - The Role of Nematodes in Ecosystems. *Nematodes Environ Indic*. <https://doi.org/10.1079/9781845933852.0001>
- Zhang W.J., Rui W.Y., Tu C., Diab H.G., Louws F.J., Mueller J.P., Creamer N., Bell M.C., Waggoner M.G., Hu S., 2005 - Responses of soil microbial community structure and diversity to agricultural deintensification. *Pedosphere* 15:440–447

INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

Tableau S1 : Liste des références bibliographiques par groupes biologiques.

Table S1: List of the bibliographical references per biological groups.

Mode de production	Groupe biologique	Références
Agriculture conventionnelle	Microorganismes totaux	Fliessbach et Mäder (2000), Glover <i>et al.</i> (2000), Castillo et Joergensen (2001), Mäder <i>et al.</i> (2002), Schjøning <i>et al.</i> (2002), Bending <i>et al.</i> (2004), Crecchio <i>et al.</i> (2004), Burger <i>et al.</i> (2005), Cardelli <i>et al.</i> (2005), Zhang <i>et al.</i> (2005), Cookson <i>et al.</i> (2006), Hartmann <i>et al.</i> (2006), Marinari <i>et al.</i> (2006), Melero <i>et al.</i> (2006), Shannon <i>et al.</i> (2006), Tu <i>et al.</i> (2006), van Diepeningen <i>et al.</i> (2006), Widmer <i>et al.</i> (2006), Briar <i>et al.</i> (2007), Esperschutz <i>et al.</i> (2007), Fliessbach <i>et al.</i> (2007), Liu <i>et al.</i> (2007), Araujo <i>et al.</i> (2008), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Stark <i>et al.</i> (2008), Araujo <i>et al.</i> (2009), Garcia-Ruiz <i>et al.</i> (2009), Okur <i>et al.</i> (2009), Mazzoncini <i>et al.</i> (2010), Moeskops <i>et al.</i> (2010), Reeve <i>et al.</i> (2010), Reganold <i>et al.</i> (2010), Sugiyama <i>et al.</i> (2010), Amaral <i>et al.</i> (2011), Coll <i>et al.</i> (2011), Ge <i>et al.</i> (2011), Romaniuk <i>et al.</i> (2011), Coll <i>et al.</i> (2012), Moeskops <i>et al.</i> (2012), Santos <i>et al.</i> (2012), Ge <i>et al.</i> (2013), Sudhakaran <i>et al.</i> (2013), Xue <i>et al.</i> (2013), Larsen <i>et al.</i> (2014), Surekha et Satishkumar (2014), Bobul'ská <i>et al.</i> (2015), Henneron <i>et al.</i> (2015), Anderson et Paulsen (2016), Gajda <i>et al.</i> (2016), Jaffuel <i>et al.</i> (2016), Velmourougane (2016), Lupatini <i>et al.</i> (2017), Maharjan <i>et al.</i> (2017), Sihi <i>et al.</i> (2017), Walmsley et Sklenička (2017), Chavarria <i>et al.</i> (2018), Kuht <i>et al.</i> (2019), Meissner <i>et al.</i> (2019), Wachter <i>et al.</i> (2019)
	Bactéries	Crecchio <i>et al.</i> (2004), Shannon <i>et al.</i> (2006), van Diepeningen <i>et al.</i> (2006), Esperschutz <i>et al.</i> (2007), Liu <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Wu <i>et al.</i> (2008), Reganold <i>et al.</i> (2010), Li <i>et al.</i> (2012), Sudhakaran <i>et al.</i> (2013), Hartmann <i>et al.</i> (2015), Henneron <i>et al.</i> (2015), Burns <i>et al.</i> (2016), Landi <i>et al.</i> (2017), Lupatini <i>et al.</i> (2017), Suja <i>et al.</i> (2017), Chavarria <i>et al.</i> (2018), Hendgen <i>et al.</i> (2018), Armalyté <i>et al.</i> (2019), Kepler <i>et al.</i> (2020)
	Champignons	Carpenter-Boggs <i>et al.</i> (2000a), Mäder <i>et al.</i> (2000), Castillo et Joergensen (2001), Schjøning <i>et al.</i> (2002), Oehl <i>et al.</i> (2004), Shannon <i>et al.</i> (2006), Esperschutz <i>et al.</i> (2007), Liu <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Mazzoncini <i>et al.</i> (2010), Reganold <i>et al.</i> (2010), Bedini <i>et al.</i> (2013), Sudhakaran <i>et al.</i> (2013), Hartmann <i>et al.</i> (2015), Henneron <i>et al.</i> (2015), Uddin <i>et al.</i> (2016), Gottshall <i>et al.</i> (2017), Landi <i>et al.</i> (2017), Suja <i>et al.</i> (2017), Chavarria <i>et al.</i> (2018), Hendgen <i>et al.</i> (2018), Banerjee <i>et al.</i> (2019), Kepler <i>et al.</i> (2020)
	Nématodes	Berkelmans <i>et al.</i> (2003), van Diepeningen <i>et al.</i> (2006), Briar <i>et al.</i> (2007), Liu <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Campos-Herrera <i>et al.</i> (2008), Garcia-Ruiz <i>et al.</i> (2009), Sánchez-Moreno <i>et al.</i> (2009), Coll <i>et al.</i> (2011), Mulder <i>et al.</i> (2011), Coll <i>et al.</i> (2012), Djigal <i>et al.</i> (2012), Henneron <i>et al.</i> (2015), Benković-Lačić <i>et al.</i> (2016), Jaffuel <i>et al.</i> (2016), Quist <i>et al.</i> (2016), Velmourougane (2016), Ilieva-Makulec <i>et al.</i> (2017), Landi <i>et al.</i> (2017)
	Micro-arthropodes	Parfitt <i>et al.</i> (2005), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Diekötter <i>et al.</i> (2010), Mazzoncini <i>et al.</i> (2010)
	Macro-arthropodes	Mäder <i>et al.</i> (2002), Heyer <i>et al.</i> (2003), Weibull <i>et al.</i> (2003), Fuller <i>et al.</i> (2006), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Sánchez-Moreno <i>et al.</i> (2009), Diekötter <i>et al.</i> (2010), Djigal <i>et al.</i> (2012), Burgio <i>et al.</i> (2015), Henneron <i>et al.</i> (2015), Velmourougane (2016), Hernández <i>et al.</i> (2017), Anyango <i>et al.</i> (2020)
	Vers de terre	Glover <i>et al.</i> (2000), Mäder <i>et al.</i> (2002), Heyer <i>et al.</i> (2003), Scullion <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Coll <i>et al.</i> (2011), Henneron <i>et al.</i> (2015), Pelosi <i>et al.</i> (2015), Crittenden et De Goede (2016), Hernández <i>et al.</i> (2017), Meissner <i>et al.</i> (2019)

Mode de production	Groupe biologique	Références
Agriculture biologique	Microorganismes totaux	Carpenter-Boggs <i>et al.</i> (2000a), Fliessbach et Mäder (2000), Glover et Andrews (2000), Castillo et Joergensen (2001), Mäder <i>et al.</i> (2002), Schjøning <i>et al.</i> (2002), Bending <i>et al.</i> (2004), Cardelli <i>et al.</i> (2005), Crecchio <i>et al.</i> (2004), Burger <i>et al.</i> (2005), Reeve <i>et al.</i> (2005), Zhang <i>et al.</i> (2005), Cookson <i>et al.</i> (2006), Hartmann <i>et al.</i> (2006), Marinari <i>et al.</i> (2006), Melero <i>et al.</i> (2006), Shannon <i>et al.</i> (2006), Tu <i>et al.</i> (2006), van Diepeningen <i>et al.</i> (2006), Widmer <i>et al.</i> (2006), Briar <i>et al.</i> (2007), Esperschutz <i>et al.</i> (2007), Fliessbach <i>et al.</i> (2007), Liu <i>et al.</i> (2007), Araujo <i>et al.</i> (2008), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Stark <i>et al.</i> (2008), Araujo <i>et al.</i> (2009), Garcia-Ruiz <i>et al.</i> (2009), Okur <i>et al.</i> (2009), Mazzoncini <i>et al.</i> (2010), Moeskops <i>et al.</i> (2010), Reeve <i>et al.</i> (2010), Reganold <i>et al.</i> (2010), Sugiyama <i>et al.</i> (2010), Amaral <i>et al.</i> (2011), Coll <i>et al.</i> (2011), Ge <i>et al.</i> (2011), Reeve <i>et al.</i> (2011), Romaniuk <i>et al.</i> (2011), Coll <i>et al.</i> (2012), Moeskops <i>et al.</i> (2012), Santos <i>et al.</i> (2012), Ge <i>et al.</i> (2013), Sudhakaran <i>et al.</i> (2013), Xue <i>et al.</i> (2013), Larsen <i>et al.</i> (2014), Surekha et Satishkumar (2014), Bobulská <i>et al.</i> (2015), Henneron <i>et al.</i> (2015), Anderson et Paulsen (2016), Gajda <i>et al.</i> (2016), Jaffuel <i>et al.</i> (2016), Velmourougane (2016), Lupatini <i>et al.</i> (2017), Maharjan <i>et al.</i> (2017), Sihi <i>et al.</i> (2017), Walmsley et Sklenička (2017), Chavarria <i>et al.</i> (2018), Kuht <i>et al.</i> (2019), Meissner <i>et al.</i> (2019), Wachter <i>et al.</i> (2019)
	Bactéries	Crecchio <i>et al.</i> (2004), Cookson <i>et al.</i> (2006), Shannon <i>et al.</i> (2006), Widmer <i>et al.</i> (2006), Esperschutz <i>et al.</i> (2007), Liu <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Wu <i>et al.</i> (2008), Reganold <i>et al.</i> (2010), Li <i>et al.</i> (2012), Sudhakaran <i>et al.</i> (2013), Hartmann <i>et al.</i> (2015), Henneron <i>et al.</i> (2015), Burns <i>et al.</i> (2016), van Diepeningen <i>et al.</i> (2006), Landi <i>et al.</i> (2017), Lupatini <i>et al.</i> (2017), Suja <i>et al.</i> (2017), Chavarria <i>et al.</i> (2018), Hendgen <i>et al.</i> (2018), Armalytè <i>et al.</i> (2019), Kepler <i>et al.</i> (2020)
	Champignons	Carpenter-Boggs <i>et al.</i> (2000b), Mäder <i>et al.</i> (2000), Castillo et Joergensen (2001), Schjøning <i>et al.</i> (2002), Oehl <i>et al.</i> (2004), Shannon <i>et al.</i> (2006), Esperschutz <i>et al.</i> (2007), Liu <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Mazzoncini <i>et al.</i> (2010), Reganold <i>et al.</i> (2010), Bedini <i>et al.</i> (2013), Sudhakaran <i>et al.</i> (2013), Hartmann <i>et al.</i> (2015), Henneron <i>et al.</i> (2015), Uddin <i>et al.</i> (2016), Gottshall <i>et al.</i> (2017), Landi <i>et al.</i> (2017), Suja <i>et al.</i> (2017), Chavarria <i>et al.</i> (2018), Hendgen <i>et al.</i> (2018), Banerjee <i>et al.</i> (2019), Kepler <i>et al.</i> (2020)
	Nématodes	Berkelmans <i>et al.</i> (2003), Mulder <i>et al.</i> (2003), van Diepeningen <i>et al.</i> (2006), Briar <i>et al.</i> (2007), Liu <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Campos-Herrera <i>et al.</i> (2008), Garcia-Ruiz <i>et al.</i> (2009), Sánchez-Moreno <i>et al.</i> (2009), Coll <i>et al.</i> (2011), Coll <i>et al.</i> (2012), Henneron <i>et al.</i> (2015), Benković-Lačić <i>et al.</i> (2016), Jaffuel <i>et al.</i> (2016), Quist <i>et al.</i> (2016), Velmourougane (2016), Ilieva-Makulec <i>et al.</i> (2017), Landi <i>et al.</i> (2017)
	Micro-arthropodes	Alvarez <i>et al.</i> (2001), Parfitt <i>et al.</i> (2005), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Diekötter <i>et al.</i> (2010), Mazzoncini <i>et al.</i> (2010)
	Macro-arthropodes	Mäder <i>et al.</i> (2002), Heyer <i>et al.</i> (2003), Weibull <i>et al.</i> (2003), Fuller <i>et al.</i> (2006), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Sánchez-Moreno <i>et al.</i> (2009), Diekötter <i>et al.</i> (2010), Burgio <i>et al.</i> (2015), Henneron <i>et al.</i> (2015), Velmourougane (2016), Anyango <i>et al.</i> (2020)
	Vers de terre	Carpenter-Boggs <i>et al.</i> (2000a), Glover <i>et al.</i> (2000), Mäder <i>et al.</i> (2002), Heyer <i>et al.</i> (2003), Reeve <i>et al.</i> (2005), Scullion <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Coll <i>et al.</i> (2011), Henneron <i>et al.</i> (2015), Pelosi <i>et al.</i> (2015), Crittenden et De Goede (2016), Meissner <i>et al.</i> (2019)

INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

Tableau S1 (suite) : Liste des références bibliographiques par groupes biologiques.

Table S1: List of the bibliographical references per biological groups.

Mode de production	Groupe biologique	Références
Agriculture biodynamique	Microorganismes totaux	Carpenter-Boggs <i>et al.</i> (2000a), Fliessbach et Mäder (2000), Mäder <i>et al.</i> (2002), Reeve <i>et al.</i> (2005), Cookson <i>et al.</i> (2006), Hartmann <i>et al.</i> (2006), Widmer <i>et al.</i> (2006), Burkitt <i>et al.</i> (2007), Esperschutz <i>et al.</i> (2007), Fliessbach <i>et al.</i> (2007), Probst <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Reeve <i>et al.</i> (2011), Jaffuel <i>et al.</i> (2016), Meissner <i>et al.</i> (2019)
	Bactéries	Cookson <i>et al.</i> (2006), Widmer <i>et al.</i> (2006), Esperschutz <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Heger <i>et al.</i> (2012), Hartmann <i>et al.</i> (2015), Burns <i>et al.</i> (2016), Hendgen <i>et al.</i> (2018)
	Champignons	Carpenter-Boggs <i>et al.</i> (2000a), Mäder <i>et al.</i> (2002), Oehl <i>et al.</i> (2004), Esperschutz <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Hartmann <i>et al.</i> (2015), Morrison-Whittle <i>et al.</i> (2017), Hendgen <i>et al.</i> (2018)
	Nématodes	Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Jaffuel <i>et al.</i> (2016)
	Micro-arthropodes	Burkitt <i>et al.</i> (2007), Birkhofer <i>et al.</i> (2008)
	Macro-arthropodes	Mäder <i>et al.</i> (2002), Birkhofer <i>et al.</i> (2008)
Vers de terre	Carpenter-Boggs <i>et al.</i> (2000a), Mäder <i>et al.</i> (2002), Reeve <i>et al.</i> (2005), Birkhofer <i>et al.</i> (2008), Meissner <i>et al.</i> (2019)	
Agriculture de conservation des sols	Microorganismes totaux	Henneron <i>et al.</i> (2015)
	Bactéries	Henneron <i>et al.</i> (2015)
	Champignons	Henneron <i>et al.</i> (2015)
	Nématodes	Djigal <i>et al.</i> (2012), Henneron <i>et al.</i> (2015)
	Micro-arthropodes	
	Macro-arthropodes	Djigal <i>et al.</i> (2012), Henneron <i>et al.</i> (2015), Hernández <i>et al.</i> (2017)
	Vers de terre	Henneron <i>et al.</i> (2015), Hernández <i>et al.</i> (2017)