



HAL
open science

Spécificité des besoins de recherche sur la qualité des sols en Agriculture Biologique. Bilan d'un séminaire transdisciplinaire INRA-ITAB

Claire Jouany, Françoise Vertès, Laetitia Fourrié, Thomas Nesme, Josephine Peigné, Lionel Ranjard, Marc Tchamitchian, Servane Penvern

► To cite this version:

Claire Jouany, Françoise Vertès, Laetitia Fourrié, Thomas Nesme, Josephine Peigné, et al.. Spécificité des besoins de recherche sur la qualité des sols en Agriculture Biologique. Bilan d'un séminaire transdisciplinaire INRA-ITAB. *Étude et Gestion des Sols*, 2023, 30, pp.97-111. hal-04010217

HAL Id: hal-04010217

<https://hal.inrae.fr/hal-04010217v1>

Submitted on 1 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Spécificité des besoins de recherche sur la qualité des sols en Agriculture Biologique

Bilan d'un séminaire transdisciplinaire

INRA-ITAB

C. Jouany^(1*), F. Vertès⁽²⁾, L. Fourrié⁽³⁾, T. Nesme⁽⁴⁾, J. Peigné⁽⁵⁾, L. Ranjard⁽⁶⁾, M. Tchamitchian⁽⁷⁾ et S. Penvern⁽⁷⁾

- 1) Université de Toulouse, INRAE, UMR 1248 AGIR, CS 52627, 31326 Castanet-Tolosan, France
- 2) UMR SAS, INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, 4 rue Stang Bihan, 29000 Quimper, France
- 3) GRAB, Maison de la Bio, 255 chemin de la Castelette, 84911 Avignon, France
- 4) Bordeaux Sciences Agro, Université de Bordeaux, UMR 1391 ISPA, CS 40201, 33170 Gradignan, France
- 5) Unité Agroécologie et Environnement, ISARA, 23 rue Jean Baldassini, 69364 Lyon Cedex 7, France
- 6) UMR1347 Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Université de Bourgogne, Université de Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France
- 7) UR Ecodéveloppement INRAE, Domaine Saint Paul, 228 route de l'Aérodrome, Site Agroparc CS 40509, 84914 Avignon, Cedex 9, France

* Auteur correspondant : clairem.jouany@gmail.com

RÉSUMÉ

En novembre 2018, l'ITAB (Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologiques) et l'INRA (Institut national de la recherche agronomique) ont organisé un séminaire transdisciplinaire pour : i) partager les enjeux associés à la gestion des sols dans les systèmes en Agriculture Biologique (AB), ii) définir collectivement les principales questions de recherche à traiter ; et iii) faciliter la construction de réseaux ou de projets.

Plus de 150 participants ont assisté au séminaire qui a été conçu à partir de la méthode d'animation citoyenne de type forum communautaire (Town Hall Meeting), permettant à l'ensemble des parties de s'exprimer et à une synthèse en direct par des experts d'être réalisée. Les résultats identifient des manques importants de connaissances sur les sols dans les systèmes en AB et les besoins de recherche. Les 20 questions issues de ces échanges portent sur : i) le fonctionnement global des sols, plus particulièrement les grands cycles biogéochimiques Carbone, Azote, Phosphore (CNP), et les interactions biologiques ; ii) les effets à long terme des pratiques agricoles plus ou moins spécifiques aux systèmes en AB ; iii) la protection des sols ; et iv) les outils de diagnostic et de gestion des sols. La plupart des questions identifiées sont génériques et nécessitent des recherches multidisciplinaires, en particulier lorsqu'elles répondent à des enjeux systémiques. Le séminaire identifie des besoins en matière de dispositif et observatoire de recherche afin d'obtenir les références qui sont

Comment citer cet article :

Jouany C., Vertès F., Fourrié L., Nesme T., Peigné J., Ranjard L., Tchamitchian M. et Penvern S, 2023 - Spécificité des besoins de recherche sur la qualité des sols en Agriculture Biologique - Bilan d'un séminaire transdisciplinaire INRA-ITAB *Étude et Gestion des Sols*, 30, 97-111

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-30/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS : <https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

nécessaires pour valider ou adapter sur les systèmes en AB les outils et méthodes d'évaluation et de gestion des sols disponibles pour les systèmes agricoles conventionnels. Les principales questions identifiées lors du séminaire sont discutées et confrontées aux dynamiques récentes de la recherche et du développement sur les sols.

Mots-clés

Agriculture biologique, co-construction, cycle biogéochimique, diagnostic, fertilité du sol, forum communautaire, qualité du sol, résilience, service écosystémique.

SUMMARY

SHARED RESEARCH QUESTIONS ON SOIL QUALITY IN ORGANIC FARMING SYSTEMS

In November 2018, ITAB (Institute of Agriculture and Organic Food) and INRA (National Institute for Agronomic Research) organized a transdisciplinary seminar to bring together stakeholders to: i) share issues associated with soil management in Organic Farming (OF) systems, ii) collectively define the main research questions to be addressed; and iii) facilitate the construction of networks or projects.

More than 150 participants attended the seminar, which was designed using the method of citizen facilitation of the community forum type (Town Hall Meeting) allowing all parties to express themselves and a live summary by experts.

The seminar identified important knowledge gaps on soils in OF systems and research needs. The 20 questions resulting from these exchanges relate to: i) the overall functioning of soils, more particularly the major biogeochemical cycles Carbon, Nitrogen, Phosphorus (CNP) and biological interactions; ii) the long-term effects of agricultural practices more or less specific to OF systems; (iii) soil protection; and iv) soil diagnostic and management tools. Most of the issues identified are generic and require multidisciplinary research, especially when responding to systemic issues. The seminar identified needs in terms of device and research observatory that provide the references necessary to validate or adapt to OF systems the tools and methods of evaluation and soil management available for conventional systems. The main questions identified during the seminar are discussed and confronted with recent dynamics in terms of soil research and development.

Key-words

Organic farming, co-construction, biogeochemical cycle, diagnosis, soil fertility, community forum, soil quality, resilience, ecosystem service.

RESUMEN

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN COMPARTIDAS SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO EN LOS SISTEMAS DE AGRICULTURA ECOLÓGICA

En noviembre de 2018, el ITAB (Instituto de Agricultura y Alimentos Orgánicos) y el INRA (Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas) organizaron un seminario transdisciplinario para reunir a las partes interesadas para: i) compartir problemas asociados con el manejo del suelo en Agricultura Orgánica (AO) sistemas, ii) definir colectivamente las principales preguntas de investigación que se abordarán; y iii) facilitar la construcción de redes o proyectos.

Más de 150 participantes asistieron al seminario, que fue diseñado utilizando el método de facilitación ciudadana del tipo foro comunitario (Town Hall Meeting) que permite que todas las partes se expresen y un resumen en vivo por parte de expertos.

Los resultados confirmaron las importantes lagunas de conocimiento sobre los suelos en los sistemas de AO y las necesidades de investigación. Las 20 preguntas resultantes de estos intercambios se relacionan con: i) el funcionamiento general de los suelos, más particularmente los principales ciclos biogeoquímicos Carbono, Nitrógeno, Fósforo (CNP) e interacciones biológicas; ii) los efectos a largo plazo de las prácticas agrícolas más o menos específicas de los sistemas de AO; iii) protección del suelo; y iv) herramientas de diagnóstico y manejo de suelos. La mayoría de los problemas identificados son genéricos y requieren una investigación multidisciplinaria, especialmente cuando se trata de responder a problemas sistémicos. El seminario identificó necesidades en cuanto a dispositivo y observatorio de investigación para obtener las referencias necesarias para validar o adaptar, en sistemas de AO, las herramientas y métodos de evaluación y manejo de suelos disponibles para sistemas convencionales. Las principales cuestiones identificadas durante el seminario son discutidas y confrontadas con la dinámica reciente en términos de investigación y desarrollo de suelos.

Palabras clave

Agricultura orgánica, co-construcción, ciclo biogeoquímico, diagnóstico, fertilidad del suelo, foro comunitario, calidad del suelo, resiliencia, servicio ecosistémico.

INTRODUCTION

Le sol, défini comme le volume de matériau meuble compris entre la surface (sous nos pieds) et la roche (dure ou meuble) qui lui a donné naissance (Feller *et al.*, 2016), remplit une multitude de fonctions agronomiques (support des cultures, prairies et forêts), environnementales, économiques, sociales et culturelles, essentielles pour la vie, et fournit un large panel de services écosystémiques (SES) (Pereira *et al.*, 2018 ; Walter *et al.*, 2015). Parmi ces services, les agences internationales ont récemment sensibilisé au rôle majeur des sols dans le développement de systèmes agricoles durables (FAO et ITPS, 2015). Par ailleurs, le choix des critères pris en compte pour définir la qualité des sols et les méthodes d'évaluation font l'objet de nombreux travaux (Bai *et al.*, 2018 ; Bünemann *et al.*, 2018). Cette question est particulièrement pertinente pour les systèmes en agriculture biologique (AB) où le maintien et l'amélioration de la qualité des sols sont considérés comme des enjeux essentiels et des leviers efficaces pour leur développement (Bai *et al.*, 2018).

Parallèlement, les méthodes et les approches utilisées pour évaluer la qualité des sols dans les agrosystèmes ont évolué, depuis des approches basées sur l'analyse scientifique et l'avis d'experts dans les années 70 jusqu'à la conception interactive et la prise de décision avec les utilisateurs finaux plus récemment (Bünemann *et al.*, 2018). Enfin, bien que plusieurs revues traitant des enjeux associés aux sols et des besoins de recherche aient été publiées ces dernières années (Adewopo *et al.*, 2014 ; Evans *et al.*, 2021), peu d'entre elles sont consacrées à des problématiques spécifiques des systèmes en AB.

Dans ce contexte et pour identifier ces problématiques, un séminaire a été organisé en 2018 par l'INRA (Institut national de recherche pour l'agriculture) et l'ITAB (Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologiques) à l'attention des acteurs du développement, de l'enseignement et de la recherche et ceux du terrain, agriculteurs et acteurs socio-économiques. Les objectifs du séminaire étaient de : i) partager les enjeux associés à la gestion des sols dans les systèmes en AB ; ii) définir collectivement les principales questions de recherche à traiter sur les sols dans les systèmes en AB ; et iii) faciliter la mise en réseau des acteurs pour initier la construction de projets de recherche.

Les objectifs de cet article sont de présenter les conclusions du séminaire et de les mettre en perspective avec les recherches en cours sur les qualités des sols. Il s'agit de montrer en quoi les questions de recherche issues de ce séminaire sont génériques ou spécifiques aux systèmes en AB et d'identifier celles pour lesquelles les réponses ne sont, *a priori*, pas disponibles pour les systèmes en AB.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Organisé par un comité transdisciplinaire rassemblant des chercheurs de différentes disciplines (Agronomie, Science du sol, Sciences de l'environnement, Science de Gestion, Géographie) et des partenaires de l'AB (ITAB et ACTA), le séminaire s'est déroulé sous la forme d'un atelier participatif qui a permis de prendre en compte, simultanément, les expertises et l'ensemble des points de vue de tous les acteurs concernés par cette question. Le séminaire, organisé à Paris le 22 novembre 2018, a réuni plus de 150 personnes. Les invitations ont été ciblées de manière à élargir autant que possible l'origine professionnelle et l'expertise disciplinaire des participants (organismes de recherche, instituts techniques, universités, établissements d'enseignement secondaire, agriculteurs, organismes de développement agricole, organisations non gouvernementales (ONG), entreprises de conception) ainsi que les types de production représentés (grandes cultures, fourrages, fruits, légumes, etc.). Le séminaire s'est déroulé en deux temps. Un premier atelier, conduit sous la forme d'un forum communautaire, avait pour objectif de produire collectivement une liste de questions de recherche. Dans un deuxième temps, chaque question a été approfondie au cours d'un atelier de co-construction de projet de recherche. Cette publication est consacrée essentiellement aux résultats obtenus dans le cadre du forum communautaire (premier atelier).

Forum communautaire

L'atelier a été conçu selon une méthode de type *Town Hall Meeting* ou forum communautaire (Slocum *et al.*, 2006 ; Tchamitchian *et al.*, 2017) dont le principe est d'organiser le dialogue entre de nombreux participants grâce à la combinaison de discussions en groupes et de sessions plénières. Cette démarche participative permet de créer des échanges, de construire et synthétiser des idées partagées. Le travail de construction se déroule en plusieurs cycles successifs ; une question est posée au début de chaque cycle pour orienter et lancer le processus de débat au sein et entre les groupes.

Dans notre cas, les 150 participants ont été répartis en 15 groupes de 10 personnes, de manière à avoir une diversité de métiers autour d'un même type de production agricole dans chaque groupe. Le travail de construction s'est déroulé selon trois cycles successifs, chacun s'appuyant sur le précédent pour traiter l'ensemble de la problématique (*Tableau 1*). Chaque question était discutée simultanément dans chaque groupe avec l'aide d'un facilitateur par groupe qui, une fois l'idée validée par tous, la transmettait au panel d'experts *via* un coordinateur, en l'occurrence trois scientifiques choisis pour leurs compétences en science du sol et/ou méthodologiques (synthèse). Les idées similaires étaient regroupées par le groupe d'experts, ce qui facilitait une reformulation prenant en

Tableau 1 - Organisation de l'atelier participatif conduit selon la méthode du forum communautaire (Tchamitchian et al., 2017).

Tableau 1 - Organization of the participatory workshop conducted using the town hall meeting method (Tchamitchian et al., 2017).

	Objectif du cycle (durée)	Question	Résultat
Cycle 1	Cadrage collectif du sujet/thème (0H45)	Pour vous, qu'est-ce qu'un sol de qualité en AB ¹ ?	Liste de critères (caractéristiques)
Cycle 2	Envisager des solutions/leviers à travailler (1H)	Quels sont les verrous à lever pour obtenir un sol de qualité* en AB? *Selon les critères définis au cycle 1	Liste de verrous
Cycle 3	Formulation des questions de recherche (1H15)	À quelles questions de recherche faut-il répondre pour lever les verrous* en AB? *Tels qu'identifiés au cycle 2	Liste de questions de recherche

¹ Agriculture Biologique

compte les différentes nuances exprimées par les groupes. La synthèse des idées était mise en commun (projetée sur un grand écran, visible par tous), permettant aux participants de réagir, modifier ou proposer de nouvelles idées.

Analyse a posteriori des résultats du séminaire dans le contexte des recherches menées sur les sols

L'analyse des listes produites à l'issue des trois cycles du forum communautaire s'appuie sur le cadre conceptuel proposé par Fossey et al. (2020). Ce schéma présente le sol comme un capital naturel générant des SES en réponse à des besoins humains et intègre la sphère des décisions publiques qui mobilise les SES pour fixer les réglementations, définir les stratégies d'aménagement et décider à l'échelle des territoires. Ce cadre permet notamment de positionner les grands types de verrous et de questions identifiés dans le séminaire au sein des arènes scientifiques, sociales et politiques et de mettre en évidence l'ensemble des SES fournis par les sols à ces différentes échelles.

Afin d'identifier en quoi les critères, verrous et questions issus du séminaire sont génériques ou spécifiques à l'AB, nous avons mobilisé l'expertise de l'ensemble des co-auteurs pour les mettre en perspective avec les projets de recherche et de développement conduits récemment sur la qualité des sols sur tous les types de systèmes de culture, en AB mais pas seulement. L'objectif est ainsi d'identifier les questions auxquelles la recherche et le développement en général n'ont, *a priori*, pas encore apporté de réponses, ou de manière partielle, et pour lesquelles des recherches sont prioritaires.

RÉSULTATS

Cycle 1 : Quels critères pour qualifier un sol de qualité en Agriculture Biologique ?

L'objectif du premier cycle était de cadrer collectivement la question traitée dans le séminaire et d'identifier les différents critères permettant de définir un sol de qualité ; ce cycle a produit 144 propositions qui ont été regroupées par les experts en une liste de 18 critères. Trois grands types de critères sont identifiés (*Tableau 2*) :

- Un premier groupe rassemble les critères relevant de la sphère environnementale ; il s'agit de propriétés des sols qui peuvent être mesurées et utilisées pour qualifier et comparer les sols. Certaines de ces propriétés sont dynamiques ; elles peuvent évoluer sous l'effet des pratiques ou de l'environnement. On retrouve également dans ce groupe l'ensemble des processus résultant des interactions entre les différentes phases (liquide, solide et gazeuse) et les organismes présents dans le sol. L'ensemble de ces critères et processus est mesurable et quantifiable. Notons que le premier critère proposé, « un sol vivant », synthétise 12 propositions et traduit une perception commune à de nombreux éleveurs et cultivateurs « bas-intrants », « économe-autonomes » et en AB (Lori et al., 2017), qui est plus globale, dynamique et fonctionnelle que celle de « sol fertile ».
- Un deuxième groupe rassemble plusieurs critères relatifs à l'évaluation globale des sols, *i. e.*, prenant en compte des interactions entre composants de l'écosystème ou entre processus, ainsi que les principaux SES qui en sont issus (régulation et maintenance, approvisionnement, culture).
- Enfin, un dernier groupe fait référence à leur contribution au bien-être de l'humanité et leur valeur patrimoniale.

On note qu'une très large majorité des critères identifiés sont génériques ; le seul faisant référence explicite aux spécificités des systèmes en AB concerne l'absence de dépendance aux intrants de synthèse (C10, *Tableau 2*).

Tableau 2 - Critères définissant un sol de qualité dans les systèmes en Agriculture Biologique (AB).**Tableau 2** - Criteria defining a quality soil in Organic Farming (OF) systems.**Propriétés et processus quantifiables**

- C11. Sol vivant (i.e. avec une bonne activité biologique et des réseaux trophiques)
- C4. Sol avec faibles niveaux de contaminants ou capable de les dégrader
- C5. Sol avec une bonne structure (stabilité, porosité, résistant à l'érosion), portant, qui permet un bon enracinement et circulation de l'eau, facile à travailler
- C6. Sol qui maintient ou augmente son stock de carbone de manière efficiente
- C7. Sol travaillé de façon adaptée au terroir, qui exprime son potentiel et ses singularités
- C9. Sol qui présente une bonne disponibilité des éléments minéraux, qui limite les pertes
- C17. Un sol couvert
- C18. Un sol dont on connaît l'historique de pratiques culturales

Services Ecosystémiques

- C2. Sol qui favorise une diversité d'organismes (dont biodiversité patrimoniale), en leur fournissant énergie et habitats
- C3. Sol intégré dans un ensemble plus vaste, qui permet aux organismes (du sol et plantes) d'assurer leurs fonctions (dont croissance et développement des plantes)
- C8. Sol qui permet une bonne gestion de l'eau (bonne infiltration, rétention, limitation du drainage, épuration/filtration)
- C10. Sol qui trouve un équilibre ou qui peut s'adapter, sans dépendance aux intrants de synthèse, résilient, résistant aux perturbations (érosion, changement climatique)
- C11. Sol qui régule les maladies, ravageurs et adventices
- C16. Sol adapté aux différents usages, multifonctionnel, fournissant une gamme de services

Contributions au bien être

- C12. Sol qui permet la durabilité économique, sociale et environnementale de l'exploitation
- C13. Sol qui permet le continuum sols - plantes - animaux - humains
- C14. Sol qui garantit des productions saines, nourrissant
- C15. Un bien commun (pérenne, transmissible)

¹ Critère numéroté selon l'ordre de validation par les experts**Cycle 2 : Quels verrous lever pour obtenir des sols de qualité en Agriculture Biologique ?**

L'objectif du deuxième cycle était d'identifier les principaux verrous à lever pour améliorer la qualité des sols en AB ainsi que les leviers qui permettent d'atteindre ces objectifs ; ce cycle a produit 136 propositions regroupées par les experts en 21 verrous à lever pour des sols de qualité dans les systèmes en AB (Tableau 3). Trois groupes se distinguent et renvoient aux principales arènes du schéma conceptuel de Fossey *et al.* (2020) :

- Le premier concerne les verrous associés à des manques de connaissances sur les processus et les interactions qui sous-tendent le fonctionnement des sols ; il s'agit de connaissances génériques qui portent sur la fermeture des cycles des nutriments (V1), les processus de minéralisation de la matière organique (V9), l'écologie des sols dans une approche globale (V8, V17), le fonctionnement des systèmes

racinaires (V19) et, enfin, la dynamique des agrosystèmes sur le long terme dans une approche interdisciplinaire (V15).

- Le second groupe concerne les manques de connaissances opérationnelles mobilisables à l'échelle du système de culture ou de l'exploitation (V6). Cela concerne l'ensemble des outils, références et méthodologies nécessaires pour analyser le fonctionnement des sols et évaluer l'impact des techniques mises en œuvre (*in situ* ou sur le terrain) (V2, V3), gérer la conversion (V21) et contrôler les ravageurs (V20). On note des besoins importants en matière de formation qui portent sur l'acquisition de connaissances et le renforcement des compétences opérationnelles (V3), sur l'amélioration du conseil donné aux agriculteurs en matière d'organisation, d'accompagnement et d'anticipation des changements (V4), et sur la nécessité de mieux structurer la formation en général, afin de lever les dogmes et les blocages (V5).
- Le dernier groupe correspond à des verrous socio-économiques et réglementaires. Il s'agit des manques de

Tableau 3 - Verrous à lever pour des sols de qualité dans les systèmes en Agriculture Biologique (AB).**Tableau 3 - Locks to be lifted for quality soils in Organic Farming (OF) systems.****Manque de connaissance sur les processus et les interactions**

- V1¹. Boucler les cycles, valoriser les ressources organiques fertilisantes à l'échelle de l'exploitation ou du territoire
- V8. Gérer les compromis & antagonismes (dont entre qualité physique et contrôles des bioagresseurs)
- V9. Manque de connaissance sur la minéralisation des matières organiques et sur les besoins des plantes
- V15. Besoin de recherche de long terme et interdisciplinaire (séries temporelles)
- V17. Manque de connaissance sur l'écologie des sols (fonctionnement des réseaux trophiques, activité biologique, effet des pratiques), dans une approche globale
- V19. Manque de connaissance sur les systèmes racinaires (dont porte-greffe et plantes de couverture)

Manque d'outils, de références et de techniques pour évaluer et gérer les sols

- V2. Manque de référence technique située et d'outil (OAD², de diagnostic, modèles) sur l'effet des techniques
- V3. Manque de connaissance, de formation et de capacité d'observation du fonctionnement des sols par les praticiens (agriculteurs, conseillers)
- V4. Mieux organiser le conseil (séparer conseil et prescription, anticiper les enjeux futurs, accompagner le changement)
- V5. Mieux structurer la formation : dépasser les blocages culturels, dépasser les dogmatismes, décriper les débats, y compris des citoyens
- V6. Manque d'intégration du sol dans les choix techniques et le fonctionnement des exploitations
- V12. Conventionalisation de l'AB : logique curative, spécialisation, dissociation des cultures et des élevages (échelle exploitation & territoire)
- V20. Manque de connaissance sur la gestion alternative des adventices et maladies (réduire la dépendance au cuivre)
- V21. Comment dépolluer des sols ex. conventionnels ou ex. industriels

Verrous socio économiques et réglementaires

- V7. Absence de réglementation adaptée à la préservation de la qualité des sols (dont protection contre urbanisation)
- V10. Amélioration de la réglementation sur les intrants (vis-à-vis de la santé des sols)
- V11. Besoin d'appréhender les sols dans leur multifonctionnalité et de rémunérer leurs services
- V13. Des variétés (et des races) et des semences pas adaptées aux sols conduits en AB (y compris pour les couverts)
- V14. Manque d'agroéquipement adapté et d'intrant efficace (minéralisation synchrone avec les prélèvements) pour le maintien de la qualité des sols
- V16. Verrous économiques : coût des intrants, de la main d'œuvre et des machines ; manque de soutien public
- V18. Manque de structuration des filières favorisant la diversification des rotations

¹ Verrou numéroté selon l'ordre de validation par les experts² Outil d'aide à la décision

ressources biologiques (V13) et d'agrofouritures adaptées aux systèmes en AB (V14), du coût important des différentes techniques culturales mises en œuvre, ainsi que du manque de soutien public (V18, V16). Les besoins en matière de réglementation concernent la préservation de la qualité des sols et leur protection vis-à-vis de l'urbanisation (V7), le contrôle de la qualité des intrants en lien avec la santé des sols (V10) et la rémunération des services rendus (V11).

Contrairement à la phase précédente dont les résultats ne font quasiment pas référence à l'AB, deux des trois groupes de verrous issus de cette phase sont essentiellement spécifiques des systèmes en AB (groupe 2 : verrous opérationnels et groupe 3 : verrous socio-économiques et réglementaires).

Cycle 3 : Quelles recherches mettre en œuvre sur les sols en Agriculture Biologique pour en améliorer la qualité ?

Le dernier cycle de l'atelier visait à identifier et à formuler les questions de recherche sur les sols à traiter de manière à lever les verrous et, *in fine*, améliorer leur qualité dans les systèmes en AB ; ce cycle a produit un total de 105 propositions synthétisées en 20 questions de recherche et regroupées en trois grands thèmes, chaque thème relevant d'un des trois grands types de verrous identifiés (*Tableau 4*).

- Un premier thème porte sur les connaissances en lien avec les processus et les interactions qui contrôlent le fonctionnement des sols. Parmi les questions identifiées, on note que plusieurs sont génériques et posées à l'échelle de

Tableau 4 - Questions de recherche à traiter pour des sols de qualité dans les systèmes en Agriculture Biologique (AB).**Tableau 4 - Research questions to address for quality soils in Organic Farming (OF) systems.****Connaissances sur le fonctionnement des sols-Processus et Interactions**

- Q1. Comment gérer les contaminants dans les sols (dépollution initiale et maintien dans le temps) et évaluer leurs effets ?
- Q3. Quels sont les liens entre biodiversité, fonctionnement du sol et services écosystémiques ?
- Q4. Quel est l'impact du pédoclimat sur la capacité de stockage de carbone (C) des systèmes en AB ? Comment évaluer les flux de C à court terme ?
- Q5. Quelles sont les conditions (agronomiques, économiques, organisationnelles) pour boucler les cycles biogéochimiques (notamment du phosphore) au niveau de l'exploitation et du territoire ? Quels leviers techniques (amendements, activateurs biologiques...) pour gérer les besoins en éléments minéraux (en quantité et dans le temps) des différentes espèces ? Quels impacts associés ?
- Q6. Quelles sont les interactions entre sols, organismes, communautés du sol et plantes (notamment en cas d'associations de cultures) ? Quelles sont les techniques à mobiliser ? (a. cas de la santé des plantes; b. de la nutrition des cultures; c. des variétés et des races)
- Q7. Quels sont les impacts à long terme (et comment les évaluer) des pratiques culturales sur les sols ?
- Q17. Quels rôles l'élevage joue-t-il dans le maintien de la qualité des sols ?
- Q19. En quoi le travail sur l'AB permet d'apporter des connaissances pour d'autres formes d'agriculture ?
- Q20. Comment rendre une racine heureuse ?

Références, outils et techniques pour évaluer et gérer

- Q8. Comment concevoir des systèmes de culture intégrés, autonomes, durables et résilients (vis-à-vis du changement climatique), protégeant la qualité des sols ?
- Q9. Quels systèmes de culture (conception & évaluation) gérant les adventices, minimisant le travail du sol (AB de conservation) ?
- Q10. Quels sont les indicateurs de diagnostic et de pilotage du bon (ou mauvais) fonctionnement (biologique, physique) d'un sol ?
- Q12. Quelles connaissances et dispositifs pour éviter la conventionnalisation de l'AB ?
- Q13. Quels outils et méthodes pour évaluer la diversité des services rendus par les sols dans les agroécosystèmes AB (et gérer les compromis) ?
- Q16. Comment construire un observatoire et/ou un réseau de parcelles de la qualité des sols en AB ?
- Q18. Comment caractériser la diversité, les trajectoires et les spécificités des situations en AB en termes d'effets sur les sols ?

Verrous Technico économiques et Organisationnels

- Q2. Comment articuler (capter, capitaliser, évaluer, diffuser) différentes formes de savoirs (locaux et académiques), expériences, recherches ?
- Q11. Comment organiser les activités agricoles à l'échelle du territoire (filières [interactions cultures-élevage], coordination entre acteurs, politiques publiques) ?
- Q14. Quels agroéquipements adaptés pour augmenter la qualité des sols ?
- Q15. Quelles innovations (pédagogiques, organisationnelles) pour construire des dynamiques collectives pluriacteurs (perception des consommateurs de l'importance des sols en AB) ?

¹ Questions numérotées selon l'ordre de validation par les experts

la parcelle. Elles concernent le fonctionnement des sols et l'impact des pratiques et du climat (Q3, Q4, Q10), avec un accent mis sur les cycles biogéochimiques (Q4, Q5, Q15), les interactions biologiques et l'écologie des sols (Q3, Q6, Q20, Q21).

- Le deuxième thème fait référence à des questions plus spécifiques qui représentent des enjeux forts pour la gestion des systèmes en AB. Cela concerne les indicateurs du fonctionnement pour le diagnostic (Q10, Q13), les dispositifs et observatoires pour évaluer l'effet des pratiques (Q12, Q17, Q19), et les méthodologies de conception de systèmes de culture (Q8, Q9, Q16).

- Le dernier thème regroupe des questions sur la recherche d'agroéquipements adaptés (Q14), les verrous organisationnels à l'échelle des territoires et des filières (Q11, Q16) et les besoins en matière de formation et de transfert aux acteurs (Q2, Q16).

Les questions se positionnent à différentes échelles, depuis la parcelle jusqu'au territoire, en passant par le système de culture. Elles mettent en évidence le rôle clé des systèmes associant la polyculture et l'élevage (PCE) dans l'entretien de la qualité des sols en AB. Cette problématique est présente au niveau des trois thèmes identifiés, à savoir : la contribution au bouclage des cycles et à l'autonomie en intrants, le maintien,

voire l'amélioration de la qualité et de la résilience des sols, et l'organisation territoriale. Par ailleurs, on observe que certaines questions de recherche sortent du périmètre strict des Sciences Biotechniques (SB) et relèvent plutôt des recherches menées par les Sciences Humaines et Sociales (SHS).

DISCUSSION

L'ensemble des échanges démontre que les différentes fonctions et services remplis par les sols doivent être pris en compte pour définir les critères de qualité, identifier les verrous, et formuler les questions de recherche à traiter sur la qualité des sols en AB. Les résultats issus de cet atelier confirment que les besoins de recherche sur les sols sont importants pour les systèmes en AB.

Sans prétendre à l'exhaustivité, ce travail a permis d'identifier collectivement 20 questions prioritaires et de les répartir selon trois grands thèmes qui ne se limitent pas à des questions strictement biotechniques puisqu'on retrouve des problématiques, relevant de la sphère publique et politique, qui nécessitent des recherches menées en partenariat avec les SHS (Tableau 4). Ces grands thèmes identifiés figuraient dans le 'Programme cadre pour la recherche et l'innovation en Agriculture Biologique', qui dresse le panorama des besoins de recherche identifiés par les acteurs, pour appuyer le développement de l'AB en France (Le Pichon et Tchamitchian, 2017). Dans la suite de la discussion, nous revenons sur les dynamiques actuelles de recherche et de développement pour chacun des trois thèmes de questions identifiées (Tableau 4).

Des connaissances génériques à venir en réponse aux questions identifiées sur les processus et interactions qui contrôlent le fonctionnement des sols

Neuf questions portent sur le fonctionnement des sols, et plus particulièrement l'ensemble des interactions physiques, chimiques et biologiques entre les différents constituants qui sous-tendent les différents SES qu'ils rendent (Fossey et al., 2020). Pour ce premier groupe, il s'agit surtout de questions génériques qui figuraient déjà dans les résultats d'enquêtes sur l'agriculture du futur (Pretty et al., 2010) ou celles ciblées sur les sols (Janzen et al., 2011 ; Adewopo et al., 2014).

L'une des premières questions est relative à l'héritage de la contamination des sols par les intrants (fertilisants, produits phytosanitaires, épandages ayant apporté des métaux lourds, etc.). Plusieurs questions soulignent la nécessité de développer des recherches pour répondre aux manques de connaissances sur la dynamique spatiotemporelle de ces intrants, identifier des solutions alternatives et limiter les risques. Une étude

récente de Santé Publique France confirme que l'exposition environnementale au cadmium, liée principalement à l'application d'intrants (engrais minéraux notamment phosphatés, fertilisants et amendements organiques) est un problème de santé publique (Oleko et al., 2020).

Spécifiquement pour les systèmes biologiques, des priorités de recherche sont identifiées pour le phosphore (P) en lien avec l'utilisation d'engrais phosphatés recyclés (Möller et al., 2017), pour les pesticides hérités des contaminations précédant la conversion (Riedo et al., 2021), et pour le cuivre en relation avec l'activité biologique des sols en systèmes de viticulture (Karimi et al., 2020). Concernant le bouclage des cycles du carbone (C), de l'azote (N) et du P, plusieurs types de questions se posent en AB. Lorsque les systèmes de production intègrent de l'élevage, les animaux découplent C et N (Vertès et al., 2019), et Pellerin et al. (2019) insistent sur la nécessité de prendre davantage en compte la composante biologique des processus qui contrôlent la dynamique de ces éléments dans les agrosystèmes. En ce qui concerne les systèmes sans élevage, pour lesquels une part importante du N et P mis en jeu dans l'exploitation n'est pas recyclée, la question de la disponibilité en effluents/sous-produits animaux (BIO à terme ?) est posée (Q17). Une étude récente (Barbieri et al., 2021) pointe également l'enjeu de la disponibilité locale en N pour les sols en AB.

Les priorités de recherche identifiées sur le cycle du C rejoignent les conclusions des études qui soulèvent les manques de connaissances sur l'effet de l'environnement pédo-climatique (Hirte et al., 2021) et des pratiques agricoles (Derrien et al., 2016) sur les mécanismes qui contrôlent la dynamique du C dans les sols cultivés. La gestion du P représente un enjeu important pour les systèmes en AB. Sur cette question, un séminaire organisé par ESPP (*European Sustainable Phosphorus Platform*) et IFOAM EU (*International Federation of Organic Agriculture Movements-European Union*) portant sur l'utilisation de produits résiduels organiques (PRO) a identifié trois enjeux prioritaires à savoir : la valeur fertilisante des engrais de ferme, la réglementation des usages des PRO et les risques de contaminations associés à leur utilisation (ESPP, 2018).

Les besoins de recherche sur les liens entre biodiversité, fonctionnement des sols et SES sont discutés dans le rapport sur la biodiversité des sols publié par la FAO (FAO, 2019) et dans des publications récentes portant sur les fonctions écologiques assurées par les organismes du sol (Eisenhauer et al., 2017) et l'intensification écologique des sols (Blanchart et Trap, 2020).

La nécessité d'améliorer les connaissances sur les interactions biotiques et leurs liens avec le fonctionnement des agrosystèmes est mise en avant par Henneron et al. (2015). Cette étape est nécessaire pour pouvoir proposer aux

agriculteurs, les variétés et/ou espèces les mieux adaptées à leurs conditions environnementales (Bedoussac *et al.*, 2015; Duchêne *et al.*, 2019; Sauvadet *et al.*, 2021). Dans cet objectif, les approches de modélisation offrent des perspectives intéressantes pour tester et évaluer différentes combinaisons de plantes et d'environnements (Gaudio *et al.*, 2019).

Enfin, les données recueillies sur des dispositifs de longue durée ont mis en évidence l'impact de la réduction du travail du sol en AB (Peigné *et al.*, 2018; Seitz *et al.*, 2019) ou en système conventionnel (Büchi *et al.*, 2017; Froslev *et al.*, 2022), et celui de l'utilisation de couverts (Büchi *et al.*, 2015; Büchi *et al.*, 2018) sur les composantes de la qualité des sols.

Les questions concernant les processus et interactions sont bien identifiées dans des revues récentes et, pour certaines, déjà traitées dans le cadre de projets menés sur les systèmes conventionnels, voire, pour certains, en AB. Cependant, pour certaines questions, la généralisation de ces résultats aux systèmes biologiques n'est possible que si des dispositifs de longue durée sont disponibles pour fournir des références en AB. La modélisation de l'effet des systèmes en AB sur le statut organique des sols est un exemple de situation où des références en AB sont nécessaires pour paramétrer les modèles disponibles pour évaluer l'impact à long terme des pratiques. Enfin, on peut noter qu'il existe peu de réponses concernant la gestion des contaminants présents dans le sol, qui est une question prioritaire lors de la conversion de terres amendées par des PRO (Michaud *et al.*, 2020).

Un besoin réel de références, outils et techniques pour évaluer et gérer les sols

Ce groupe de questions met en évidence des besoins plus spécifiques des systèmes en AB qui portent sur les manques de connaissances opérationnelles pour faire un diagnostic, mettre au point des règles de décisions et piloter les pratiques.

Les outils actuellement disponibles pour un diagnostic à l'échelle de la parcelle sont ceux mobilisés par l'agriculture conventionnelle. À cette échelle, les besoins d'indicateurs rendant compte du fonctionnement biologique des sols sont clairement identifiés (Balloy *et al.*, 2017; Karimi *et al.*, 2020; Colleu *et al.*, 2019). Alors que des indicateurs microbiens sont déjà opérationnels pour le diagnostic (Bouchez *et al.*, 2017), une méta-analyse récente, analysant les impacts des modes de production sur la qualité écologique des sols, identifie des besoins en recherche sur des bio-indicateurs s'appuyant sur les organismes de la faune du sol (Christel *et al.*, 2022).

Plusieurs projets récents visent à tester et développer de nouveaux indicateurs intégrant la composante biologique de la qualité des sols. Brauman et Thoumazeau (2020) proposent l'indice Biofunctool® pour évaluer l'impact de la gestion des terres sur la qualité du sol dans les agrosystèmes tropicaux;

cet indice s'appuie sur un jeu de douze indicateurs (reliés aux propriétés physico-chimiques et à l'activité biologique) pour évaluer trois fonctions principales des sols, à savoir la dynamique du C, le cycle des nutriments et le maintien de la structure (Brauman et Thoumazeau, 2020). Cet indice est en cours de validation pour les agrosystèmes tempérés.

En parallèle, le projet Agro-Eco Sol (Aurea, 2021) a pour objectif d'intégrer la composante biologique de la fertilité des sols dans les outils de diagnostic et le conseil. Les différents indicateurs testés sont associés aux fonctions liées aux cycles du C et du N, et à celles liées à l'abondance et à la diversité des microorganismes et de la faune du sol.

Plus spécifiquement, pour les systèmes en AB, des besoins sont identifiés en matière d'indicateurs pour la gestion du P à partir d'analyses de sols (Cooper *et al.*, 2018), et pour évaluer les risques de contaminations associés à l'utilisation de fertilisants issus du recyclage (Möller *et al.*, 2017). Concernant les indicateurs de la qualité biologique des sols, il faut noter une forte évolution depuis le séminaire, et l'offre de service dans ce domaine a explosé. En France, il existe actuellement une trentaine de structures qui proposent des indicateurs de la qualité biologique des sols. Tous ne sont pas rationnels, validés par la recherche ou même associés à des vrais référentiels d'interprétation, mais l'offre de service est bien présente.

Les observatoires de longue durée de systèmes biologiques sont des dispositifs essentiels pour comprendre le fonctionnement des agroécosystèmes et leur intérêt en AB est mis en avant pour les systèmes de culture (Fontaine *et al.*, 2019) dont le maraîchage (Norris et Congreves, 2018). Des besoins semblables sont remontés d'enquêtes menées en systèmes viticoles (Karimi *et al.*, 2020) et en arboriculture fruitière (Colleu *et al.*, 2019). Ces plateformes expérimentales sont utiles pour accompagner l'essor de l'AB; elles permettent d'acquérir des références, d'évaluer les effets des pratiques et de tester des outils et indicateurs pour les piloter (Fontaine *et al.*, 2019; Bonnet *et al.*, 2021).

Ces observatoires permettent également de mesurer les effets à long terme des pratiques sur les propriétés des sols (Peigné *et al.*, 2018; Seitz *et al.*, 2019) et sur la fourniture de SES tels que le stockage du C (Autret *et al.*, 2016), le maintien de la diversité et de l'activité biologique (Bai *et al.*, 2018) ou la dynamique des nutriments (Charles *et al.*, 2017).

Enfin, ces dispositifs permettent également de partager les connaissances et savoir-faire lors d'ateliers et de séminaires et favorisent la co-conception d'outils et de méthodes d'évaluation des pratiques (Fontaine *et al.*, 2019).

En ce qui concerne les besoins en matière de conception de systèmes de culture, Le Pichon et Tchamitchian (2017) considèrent que cette question est prioritaire pour l'AB; ils recommandent qu'elle soit traitée en associant les acteurs de la recherche, du développement et les agriculteurs, voire les consommateurs,

afin qu'un véritable échange de savoirs soit organisé entre ces différents acteurs. L'implication des filières est également essentielle pour soutenir la diversification des systèmes de culture, levier essentiel en AB (Meynard et Messéan, 2014).

Pour répondre aux problématiques de conception de systèmes, la recherche a développé récemment des jeux sérieux ; il s'agit d'expérimentations virtuelles qui permettent de tester, entre acteurs, tous les champs des possibles en matière de scénarios de conception de système de culture. Ces outils favorisent les échanges et permettent les partages d'expérience et de connaissances techniques locales entre les différents participants (chercheurs, conseillers, agriculteurs) (Idèle, 2013 ; Jouan et al., 2020 ; Boulestreau et al., 2021).

Contrairement au précédent paragraphe qui regroupait des questions génériques, les questions relatives à l'évaluation et à la gestion des sols en AB renvoient à des problématiques plus spécifiques qui avaient déjà été reconnues comme prioritaires (Le Pichon et Tchamitchian, 2017). L'ensemble de ces questions n'est pas encore complètement pris en charge par la recherche et le développement. C'est le cas par exemple de la gestion de la nutrition phospho-potassique pour laquelle la méthode du COMIFER (COMIFER, 2019) est actuellement opérationnelle pour différentes cultures et types de sols, en systèmes conventionnels. Elle n'est pas validée pour des systèmes en AB, faute de références disponibles pour caler les seuils et les préconisations.

Un besoin de recherche participative et interdisciplinaire en réponse aux problématiques socio-économiques et organisationnelles

En plus des questions identifiant des manques de connaissances ou de références, plusieurs sujets renvoient à des problématiques socioéconomiques et organisationnelles, pas uniquement ciblées sur les sols. Ce dernier thème regroupe des questions qui ne peuvent pas être traitées par les SB seules, puisque la plupart des réponses relèvent de décisions collectives ou publiques.

C'est le cas de la disponibilité des agro équipements pour augmenter la qualité des sols qui, au-delà des problématiques agronomiques, soulève des questions de réglementation, de normalisation et de sécurité alimentaire notamment en maraîchage (ESPP, 2018 ; Arvalis, 2021 ; Leschenne et Speiser, 2021) ou d'acceptabilité sociale pour l'utilisation de déchets humains par exemple (Berner, 2013 ; Legrand, 2020).

Le séminaire a mis en avant des besoins en matière de transmission des connaissances du terrain ; en partant du constat que les agriculteurs connaissent très bien les caractéristiques de leurs sols, il est essentiel que leurs points de vue soient pris en compte.

À ce sujet, Chenu et al. (2019) jugent nécessaire d'associer le monde académique et celui de l'opérationnalité et considèrent qu'il s'agit d'un axe de recherche à renforcer pour une meilleure gestion du C dans les sols. Cette approche est jugée nécessaire pour développer des indicateurs de la qualité des sols pertinents et opérationnels (Bünemann et al., 2018) et pour identifier les leviers les mieux adaptés aux situations pédoclimatiques (Bai et al. 2018 ; Karimi et al., 2021). Des travaux récents confirment l'intérêt de prendre en compte le point de vue des agriculteurs lorsqu'il s'agit d'adapter les outils disponibles pour travailler le sol en systèmes AB avec semis direct sous couvert végétal (Vincent-Caboud, 2020) ou de développer des indicateurs paysans (Akpo et al., 2016 ; Seyni Bodo et al., 2019).

L'intégration des cultures et de l'élevage à l'échelle du territoire nécessite de lever un certain nombre de verrous organisationnels depuis la sphère socioéconomique des filières, jusqu'à ceux des politiques publiques (Moraine et al., 2017). Cet enjeu, prioritaire pour le maintien de la qualité des sols dans les systèmes en AB, nécessite des recherches associant les SB et les SHS pour développer des approches socio-écologiques et transdisciplinaires (Thérond et al., 2017 ; Ryschawy et al., 2017).

Les questions relatives aux problématiques socio-économiques et organisationnelles soulignent la nécessité de développer des recherches participatives afin de mieux prendre en compte la spécificité de chaque situation culturelle et la perception que les agriculteurs ont de leurs sols et de leurs systèmes de culture. Elles confirment également l'intérêt de développer des recherches interdisciplinaires pour traiter conjointement des besoins relevant d'approches biotechniques et socio-économiques.

Atouts et limites de la méthode et bilan du séminaire

Le principe de la méthode de type *Town Hall Meeting* est basé sur une approche progressive sans thème défini *a priori* pour les différents ateliers, contrairement aux enquêtes pour lesquelles le cadre général et les questions à débattre sont connus au départ (Adewopo et al., 2014 ; Pretty et al., 2010). De ce fait, le séminaire a permis l'expression d'une grande diversité des points de vue des participants et l'émergence de deux problématiques dès la définition des verrous puis celle des questions (*Tableau 4*) à savoir : i) le rôle des systèmes associant la PCE dans l'entretien de la qualité des sols des systèmes en AB et ii) la nécessité de développer des approches multidisciplinaires, en particulier avec les SHS.

Le rôle de la PCE, et plus généralement celui de la diversification des systèmes en tant que levier pour la transition agroécologique, est mis en avant dans plusieurs études qui démontrent son impact positif sur l'autonomie en N des systèmes agricoles et la réduction des risques environnementaux (Billen *et al.*, 2017; Lemaire *et al.*, 2014). D'autre part, le séminaire a confirmé qu'il existe un besoin d'interactions entre les disciplines, non seulement au sein des SB mais aussi entre les SB et les SHS, pour répondre à des questions posées pour la gestion durable des sols. Cette conclusion est partagée avec celle de plusieurs auteurs dont les publications portent sur les perspectives de recherches à mettre en œuvre pour gérer durablement les sols (Janzen *et al.*, 2011; Amundson, 2020; Evans *et al.*, 2021). À ce sujet, un colloque rassemblant des chercheurs en sciences sociales et en sciences du sol a mobilisé les transversalités entre les deux champs disciplinaires pour répondre aux questions posées par la gestion des sols dans la transition socio-écologique (Pacte, 2021).

Cependant, certaines questions ou certains thèmes n'ont pas été traités, alors qu'ils représentent des enjeux forts pour les systèmes en AB. On a noté l'absence de questions sur la gestion des sols dans les systèmes fourragers alors que ces derniers présentent de nombreux atouts du fait des SES qu'ils fournissent (Martin *et al.*, 2020). Cette absence est d'autant plus remarquable que les systèmes de PCE sont clairement identifiés comme des leviers forts pour maintenir et améliorer la qualité des sols dans les systèmes en AB (Tableau 4). Enfin, on pouvait s'attendre à ce que le développement de l'agriculture en milieu urbain soulève des questions en matière de gestion des contaminants et de fourniture de SES (Grard *et al.*, 2018), cela n'a pas été le cas.

Par ailleurs, le séminaire a servi d'incubateur pour au moins deux projets qui ont été lauréats de l'appel à projet de développement agricole et rural, d'innovation et de partenariat (CASDAR-IP) en 2020. Le projet PhosphoBio (PhosphoBio, 2020) traite du P comme élément clé de la fertilité des sols en AB; son objectif est d'acquérir des références pour concevoir des outils de diagnostic, et d'évaluer les leviers d'actions pour améliorer et gérer durablement la fertilité P dans les systèmes AB. Le second projet, Metha-BioSol (Metha-BioSol, 2020), a pour objectif de développer, avec les acteurs du terrain, des outils de diagnostic opérationnels de type bio-indicateur, pour évaluer l'impact des apports de PRO sur la qualité biologique des sols. De même, les questions d'accompagnement des acteurs issues de ce séminaire ont été intégrées dans des projets de R&D pour aider les agriculteurs et conseillers à concevoir et évaluer des systèmes en AB qui préservent la qualité des sols. C'est le cas du projet Absolu (Absolu, 2022) qui vise à accompagner les fermes biologiques vers de meilleures pratiques pour la qualité des sols. Enfin, à l'échelle des grands groupes de la filière agroalimentaire, on observe depuis peu

le développement d'une offre dynamique de mise en place de pratiques *via* des cahiers des charges qui peuvent être dérivés de l'AB ou de l'Agriculture de conservation. L'objectif de ces partenariats, mis en place dans le cadre de la démarche de responsabilité sociale des entreprises, est de développer des systèmes agroécologiques *i. e.* des systèmes à faible émission et forte capacité de stockage de C et stimulant la biodiversité et la fonctionnalité des sols.

CONCLUSION

Cet atelier a permis de définir collectivement des questions de recherche sur la qualité des sols. Si l'exercice portait strictement sur les systèmes en AB, la confrontation des résultats du séminaire avec la bibliographie récente montre que bon nombre de ces questions sont génériques et peuvent intéresser une communauté plus large.

Les évolutions conceptuelles et méthodologiques et les tendances actuelles, identifiées pour les sols en général, sont ressorties lors des échanges et des débats ciblés sur les systèmes biologiques. Au-delà des questions de recherche *sensu stricto*, le séminaire a montré que les participants partageaient une vision très large des problématiques 'sol' dans les systèmes en AB, depuis les fonctions du sol en tant que capital naturel générant des SES (en réponse à des besoins humains) jusqu'à l'arène politique, où ces connaissances sont prises en compte pour appuyer les décisions publiques et renforcer les stratégies de gestion à l'échelle territoriale (Fossey *et al.*, 2020).

L'approche globale de la qualité des sols et l'importance des enjeux systémiques soulevés lors de l'atelier démontrent l'intérêt des systèmes en AB en tant qu'objet de recherche innovant et pertinent, pour questionner les relations entre les fonctionnalités des sols et les SES rendus dans l'objectif d'améliorer la durabilité des systèmes de production.

Beaucoup de ces questions apparaissent multidisciplinaires et systémiques en raison de la diversité des participants et du processus d'entonnoir qui a conduit à les exprimer. Ce point souligne la nécessité d'élargir les frontières plutôt fermées jusqu'à présent, et de décloisonner les disciplines et les organisations pour développer des recherches interdisciplinaires, voire transdisciplinaires.

Les contraintes de la méthode utilisée pour le forum communautaire ont limité le nombre et la précision des résultats obtenus et certaines idées intéressantes, mais isolées, ont pu être également sous-représentées. Néanmoins, le processus de co-conception et l'adhésion de toutes les parties à ces questions de recherche est une étape intermédiaire qui offre des perspectives pour construire des réseaux et des projets de recherche et développement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le programme Agri Bio d'INRAe, et l'ITAB pour leur soutien financier. Nous remercions Fabienne Barataud, Marion Casagrande, Francesca Degan, Blaise Leclerc et Thierry Mercier pour leur participation au comité d'organisation, ainsi que l'ensemble des participants au séminaire pour la richesse de leurs contributions.

BIBLIOGRAPHIE

- Absolu (2022). <http://itab.asso.fr/programmes/absolu.php> consulté le 18 avril 2022
- Adewojo J.B., Van Zomeren C., Bhomia R.K., Almaraz M., Bacon A.R., Eggleston E., Judy J.D., Lewis R.W., Lusk M., Miller B., Moorberg C., Hodges Snyder E., Tiedeman M.L. (2014). Top-Ranked Priority Research Questions for Soil Science in the 21st Century. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 78, pp. 337-347, DOI 10.2136/sssaj2013.07.0291
- Akpo M.A., Saidou A., Yabi I., Balogoun I., Bio Bigou L. (2016). Indicateurs paysans d'appréciation de la qualité des sols dans le bassin de l'Okpara au Bénin. *Etude et Gestion des Sols*, 23, pp. 53-64, https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/09/EGS_23_1_2303_Akpo_53_64.pdf consulté le 22 avril 2022
- Amundson R. (2020). The policy challenges to managing global soil resources, *Geoderma*, 379, 114639, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114639>
- Arvalis (2021). De nouvelles règles pour les effluents utilisables en AB, <https://www.arvalis-infos.fr/effluents-d-elevage-utilisables-en-ab-des-restrictions-s-appliquent-des-le-1er-janvier-2021-@view-33858-arvarticle.html> consulté le 22 avril 2022
- Aurea (2021). Développement d'un filière technique et économique sur le diagnostic et le conseil pour une gestion agroécologique des sols cultivés, <https://www.aurea.eu/5658-2/> consulté le 22 avril 2022
- Autret B., Mary B., Chenu C., Balabane M., Girardin C., Bertrand M., Grandeau G., Beaudoin N. (2016). Alternative arable cropping systems: a key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16-year field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 232, 150-164, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.008>
- Bai Z., Caspari T., Gonzales M.R., Batjes N.H., Bünemann E.K., Goede R., Brussard L., Xu M., Ferreira C.S.S., Reitam E., Fan H., Mihelic R., Glavan M., Tóth Z. (2018). Effects of agricultural management practices on soil quality: a review of long-term experiments for Europe and China. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 265, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>
- Balloy B., Bispo A., Bouthier A., Chenu C., Cluzeau D., Metzger L. (2017). Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols., 61 p., (hal-02788601) consulté le 22 avril 2022
- Barbieri P., Pellerin S., Seufert V., Smith L., Ramankutty N., Nesme T. (2021). Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. *Nat. Food*, 2, pp. 363-372, <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00276-y>
- Bedoussac L., Journet E.P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Steen Jensen E., Prieur L., Justes E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 35, pp. 911-935, <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>
- Berner A., Böhm H., Brandhuber R., Braun J., Brede U., Colling-von Roesgen J.L., Demmel M., Dierauer H., Ewald B., Fließbach A., Fuchs J., Gattinger A., Heß J., Hülsbergen K.J., Köchli M., Kolbe H., Koller M., Mäder P., Müller A., Patzel N., Pfiffner L., Schmidt H., Weller S., Melanie Wild M. (2013). Les principes de la fertilité des sols. Construire sa relation avec le sol. Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, Bio Suisse (Eds), 32 p., <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1587-fertilité-des-sols.pdf> consulté le 22 avril 2022
- Billen G., Le Noë J., Lassaletta L., Thieu V., Anglade J., Petit L., Garnier J. (2017). Et si la France passait au régime « Bio, Local et Demitarien » ? Un scénario radical d'autonomie protéique et azotée de l'agriculture et de l'élevage, et de sobriété alimentaire. Le DEMETER 2017, 23^e Edition, Economie et stratégie agricoles, pp. 389-406. Club DEMETER, Paris ISSN/1166-2115.
- Blanchart E., Trap J. (2020). Intensifier les fonctions écologiques du sol pour fournir durablement des services écosystémiques en agriculture. *Etude et Gestion des Sols*, 27, pp. 121-134, https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/04/EGS_2020_27_Blanchart-121-134.pdf consulté le 22 avril 2022
- Bonnet C., Gaudio N., Alletto L., Raffailac D., Bergez J.E., Debaeke P., Gavaland A., Willaume M., Bedoussac L., Justes E. (2021). Design and multicriteria assessment of low-input cropping systems based on plant diversification in southwestern France. *Agr. Sustain. Dev.*, 41, 65, <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00719-7>
- Bouchez T., Blieux 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. (2017). La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental. *Etude et Gestion des Sols*, 24, pp. 9-31, https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/09/EGS_24_1_EGS_2017_24_1_Bouchez_9_31.pdf consulté le 22 avril 2022
- Boulestreau Y., Casagrande M., Navarrete M. (2021). Analyzing barriers and levers for practice change: a new framework applied to vegetables' soil pest management. *Agr. Sustain. Dev.*, 41, 44, <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00700-4>
- Brauman A., Thoumazeau A. (2020). Biofuntool® : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol. *Etude et Gestion des Sols*, 27, pp. 289-303, https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/07/EGS_2020_27_Brauman_289-304.pdf consulté le 22 avril 2022
- Büchi L., Gebhard C.A., Liebisch F., Sinaj S., Ramsaier H., Charles R. (2015). Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. *Plant Soil*, 393, pp. 163-175, <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2476-7>
- Büchi L., Wendling M., Amossé C., Jeangros B., Sinaj S., Charles R. (2017). Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long-term experiment in Switzerland. *Soil Tillage Res.*, 174, pp. 120-129, <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.002>
- Büchi L., Wendling M., Amossé C., Necpalova M., Charles R. (2018). Importance of cover crops in alleviating negative effects of reduced soil tillage and promoting soil fertility in a winter wheat cropping system. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 256, pp.92-104, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.005>
- Bünemann K.E., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Flesskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L. (2018). Soil quality - A critical review. *Soil Biol. Biochem.*, 120, pp. 105-125, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

- Charles R., Wendling M., Büchi, L., Casagrande M., Celette F., Fontaine L., Jouany C. (2017). Les CIMS pour améliorer la productivité en Agriculture Biologique dans les systèmes de culture assolés. *Innovations Agronomiques*, 62, pp. 131-141, <https://doi.org/10.15454/1.517407968140441E12>
- Chenu C., Angers D.A., Barré P., Derrien D., Arrouays D., Balesdent J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations, *Soil Tillage Res.*, 188, pp. 41-52, <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Christel A., Maron P.A., 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, pp. 117-144, https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2022/02/EGS_2022_29_Christel_117-144.pdf consulté le 22 avril 2022
- Colleu S., Goutines C., Guillermin P., Delavaud M., Fourrié L., et al. (2019). Gestion des sols de vergers : panorama des outils et travaux, pistes pour la recherche. Rapport technique, hal-02789711 consulté le 22 avril 2022
- COMIFER (2019). La fertilisation P-K-Mg. Les bases du raisonnement, https://comifer.asso.fr/images/publications/brochures/COMIFER_RAPPORT_fertilisation_15102019.pdf consulté le 22 avril 2022
- Cooper J., Reed S., Reed E., Härtenhuber S., Lindenthal S., Løes A.K., Mäder P., Magid J., Oberson A., Kolbe H., Möller K. (2018). Phosphorus availability on many organically managed farms in Europe. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 110, pp. 227-239, <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9894-2>
- Derrien D., Dignac M.F., Basile-Doelsch I., Barot S., Cécillon L., Chenu C., Chevallier T., Chen B., Coleman D.C., Boer W.D., Rüter P.D., DeLuca T.H., Frati F., Griffiths B.S., Hart M.M., Hättenschwiler S., Haimi J., Heethoff M., Kaneko N., Kelly L.C., Leinaas H.P., Lindo Z., Macdonald C., Rillig M.C., Ruess L., Scheu S., Schmidt O., Seastedt T.R., van Straalen N.M., Tiunov A.V., Zimmer M., Powell J.R. (2017). Priorities for research in soil ecology, *Pedobiologia*, 63, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2017.05.003>
- ESPP (2018). Closing-nutrient-cycles-in-organic-farming, <https://www.phosphorusplatform.eu/events/26-scope-in-print/1649-closing-nutrient-cycles-in-organic-farming?print=0&download=1&id=1649> consulté le 22 avril 2022
- Evans D., Janes-Bassett V., Borrelli P., Chenu C., Ferreira C., Griffiths R., Kalantari Z., Keesstra S., Lal R., Panagos P., Robinson D., Seifollahi-Aghmiuni S., Smith P., Steenhuis T., Thomas, A., Visser S. (2021). Sustainable futures over the next decade are rooted in soil science. *Eur. J. Soil Sci.*, 73, 1, <https://doi.org/10.1111/ejss.13145>
- FAO et ITPS. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWRS) - Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, <http://www.fao.org/documents/card/fr/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/> consulté le 22 avril 2022
- FAO. (2019). The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture, J. Bélanger & D. Pilling (eds.). FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. Rome. 572 pp., <http://www.fao.org/3/CA3129EN/CA3129EN.pdf> consulté le 22 avril 2022
- Feller C., Marsily G.D., Mougin C., Pérès G., Poss R., Winiarski T. (2016). Le sol : une merveille sous nos pieds. Belin, ISSN 978-2-7011-8349-7, 256 p.
- Fontaine L., Celette F., Cordeau S., Métails P., Vacher C., Cohan J.-P., Fourrié L., Jouany C., Leclerc B., Véricel G., Vian J.-F., Aveline A., de Cordoue A.-L., Boissinot F., Burel E., Castel L., Champion J., Desclaux D., Dupont A., Le Bras M., Prieur L., Quirin T., Thévenon P., Casagrande M. (2019). InnovAB - Améliorer les systèmes de grande culture en agriculture biologique : enseignements d'un réseau d'expérimentations de longue durée. *Innovations Agronomiques* 71, pp. 295-309, <https://dx.doi.org/10.15454/8lpmxj>
- Fossey M., Angers D., Bustany C., Cudennec C., Durand P., Gascuel-Oudou C., Jaffrezic A., Pérès G., Besse C., Walter C. (2020). A Framework to Consider Soil Ecosystem Services in Territorial Planning. *Front. Environ. Sci.*, 8, 28, <https://dx.doi.org/10.3389/FENV.S.2020.00028>
- Froslev T.G., Nielsen I.B., Santos S.S., Barnes C.J., Bruun H.H., Ejrnæs R. (2022). The biodiversity effect of reduced tillage on soil microbiota. *Ambio*, 51, pp. 1022-1033, <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01611-0>
- Gaudio N., Escobar-Gutiérrez A.J., Casadebaig P., Evers J.B., Gérard F., Louarn G., Colbach N., Munz S., Launay M., Marrou H., Barillot R., Hinsinger P., Bergez J.E., Combes D., Durand J.L., Frak E., Pagès L., Pradal C., Saint-Jean S., Van Der Werf W., Justes E. (2019). Current knowledge and future research opportunities for modeling annual crop mixtures. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 39, 20, <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0562-6>
- Grard B.J.P., Chenu C., Manouchehri N., Houot S., Frascaria-Lacoste N., Aubry C. (2018). Rooftop farming on urban waste provides many ecosystem services. *Agron. Sustain. Dev.*, 38, 1, <https://dx.doi.org/10.1007/s13593-017-0474-2>
- 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, pp. 169-18, (10.1007/s13593-014-0215-8).(hal-01173289)
- Hirte H., Walder F., Hess J., Büchi L., Colombi T., van der Heijden M.G.A., Mayer J. (2021). Enhanced root carbon allocation through organic farming is restricted to topsoils. *Sci. Total Environ.*, 755, 143551, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143551>
- Idèle (2013). Le Rami Fourrager: Pourquoi ?, https://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/Rami_fourrager.pdf consulté le 22 avril 2022
- Janzen H.H., Fixen P.E., Franzluebbers A.J., Hattey J., Izaurralde R.C., Ketterings Q.M., Lobb D.A., Schlesinger W.H. (2011). Global prospects rooted in soil science. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75, p. 1-8, <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0216>
- Jouan J., De Graeuwe, M., Carof M., Baccar R., Bareille N., Bastian S., Brogna D., Burgio G., Couvreur S., Cupiał M., Dumont B., Jacquot A.L., Magagnoli S., Makulska J., Maréchal K., Pérès G., Ridier A., Salou T., Tombarkiewicz B., Sgolastra F., Godinot O. (2020). Learning Interdisciplinarity and Systems Approaches in Agroecology: Experience with the Serious Game SEGAE. *Sustainability*, 12, 4351, <https://doi.org/10.3390/su12114351>
- Karimi B., Cahurel J.-Y., Gontier L., Charlier L., Chovelon M., Mahé H., Ranjard L. (2020). Revue scientifique sur la qualité

- biologique des sols de vignes et l'impact des pratiques viticoles. *Etude et Gestion des Sols*, 27, pp. 221-239, https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/06/EGS_2020_27_Karimi_221-240.pdf consulté le 22 avril 2022
- Karimi B., Masson V., Guillaud C., Pellegrinelli S., Leroy E., 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 de vignes ? Synthèse des connaissances scientifiques. *Etude et Gestion des Sols*, 28, pp. 71-92, https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2021/01/EGS_2021_28_Karimi_71-92.pdf consulté le 22 avril 2022
- Legrand M. (2020). Digestions fertiles ? Le retour au sol des excréments humains. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 14-4, <https://doi.org/10.4000/rac.11042>
- Lemaire G., Franzluebbers A.J., Carvalho P.C.D.F., Dedieu B. (2014). Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agric. Ecosyst. Environ.*, pp. 4-8, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>
- Le Pichon V., Tchamitchian M. (2017). Programme cadre français pour la recherche et l'innovation en Agriculture Biologique, FROG, ITAB, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01602287/file/frog_web_1.pdf consulté le 22 avril 2022
- Leschenne V., Speiser B. (2021). Reflections on the acceptability of recycled P fertilisers for European organic agriculture. Version 2, 29 September 2021, FiBL, https://www.betriebsmittelliste.ch/fileadmin/bml-ch/documents/stellungnahmen/Recycled_P_fertilisers_v2_Sept_2021.pdf consulté le 22 avril 2022
- Lori M., Symnackz 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, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180442>
- Martin G., Durand J., Duru M., Gastal F., Julier B., Litrico I., Louarn G., Médiène S., Moreau D., Valentin-Morison M., Nowak S., Pernaudeau V., Paschalidou F., Vertès F., Voisin A.S., Cellier P., Jeuffroy M.H. (2020). Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 40, 17, <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00620-9>
- Metha-BioSol (2020). Metha-BioSol <https://www6.inrae.fr/metha-biosol/> consulté le 22 avril 2022
- Meynard J.M., Messéan A. (2014). La diversification des cultures : lever les obstacles agronomiques et économiques. *QUAE éditions* - 103 p., <https://www.quae.com/produit/1277/9782759222803/la-diversification-des-cultures/preview?escape=false#lg=1&slide=4> consulté le 22 avril 2022
- Michaud A.M., Cambier P., Sappin-Didier V., Deltreil V., Mercier V., Rampon J.N., Houot S. (2020). Mass balance and long-term soil accumulation of trace elements in arable crop systems amended with urban composts or cattle manure during 17 years. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27, pp. 5367-5386, <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07166-8>
- Möller K., Oberson A., Bünemann K. E., Cooper J., Friedel J.K., Glaesner N., Hörtenhuber S., Loes A.K., Mäder P., Meyer G., Müller T., Symanczik S., Weissgruber L., Wollmann I., Magid J. (2017). Improved phosphorus recycling in organic farming: navigating between constraints. *Adv. Agron.*, 133, pp. 159-233, <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.10.004>
- Moraine M., Théron O., Ryschawy J., Martin G., Nowak B., Nesme T., Gazon P., Duru M. (2017). Complémentarités territoriales entre culture et élevage, entre action collective et contraintes organisationnelles. *Fourrages*, 231, pp. 247-255, https://abiodoc.docressources.fr/doc_num.php?explnum_id=3268 consulté le 22 avril 2022
- Norris C.E., Congreves K.A. (2018). Alternative management practices Improve soil health indices in intensive vegetable cropping systems: a Review. *Front. Environ. Sci.*, 6, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00050>
- Oleko A., Fillol C., Saoudi A., Zeghnoun A., Bidondo M.L., Gane J., Balicco A. (2020). Imprégnation de la population française par le cadmium. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. Saint-Maurice : Santé publique France, 2021. 53 p., <https://www.santepubliquefrance.fr> consulté le 22 avril 2022
- Pacte (2021). <https://www.pacte-grenoble.fr/actualites/sols-sous-sols-dans-la-transition-socio-ecologique> consulté le 22 avril 2022
- Peigné J., Vian J. F., Payet V., Saby N.P. (2018). Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming. *Soil Tillage Res.*, 175, pp. 194-204, <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.008>
- Pellerin S., Bamière L., Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Bellassen V., Cardinael R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Darroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A.I., Guenet B., Houot S., Klumpp K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri S., Mézière D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Théron O., Viaud V., Gâteau R., Le Perchec S., Savini I., Réchauchère O. (2019). Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 p., <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Rapport%20Etude%204p1000.pdf> consulté le 22 avril 2022
- Pereira P., Bogunovic I., Munoz-Rojas M., Brevik E. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, 5, pp. 7-13, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>
- PhosphoBio (2020). <https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/phosphobio> consulté le 22 avril 2022
- Pretty J., Sutherland W.J., Ashby J., Auburn J., Baulcombe D., Bell M., Bentley J., Bickersteth S., Brown K., Burke J., Campbell H., Chen K., Crowley E., Crute I., Dobbelaere D., Edwards-Jones G., Funes-Monzote F., Godfray H.C. J., Griffon M., Gypmantisiri P., Haddad L., Halavatau S., Herren H., Holderness M., Izac A.M., Jones M., Koohafkan P., Lal R., Lang T., McNeely J., Mueller A., Nisbett N., Noble A., Pingali P., Pinto Y., Rabbinge R., Ravindranath N.H., Rola A., Roling N., Sage C., Settle W., Sha J.M., Shiming L., Simons T., Smith P., Strzepeck K., Swaine H., Terry E., Tomich T.P., Toulmin C., Trigo E., Twomlow S., Vis J.K., Wilson J., Pilgrim S. (2010). The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. *Int. J. Agri. Sustain.*, 8, pp. 219-236, <https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0534>
- Riedo J., Wettstein F.E., Rösch A., Herzog C., Banerjee S., Büchi L., Charles R., Wächter D., Martin-Laurent F., Bucheli T.D., Walder F., van der Heijden M.G.A. (2021). Widespread Occurrence of Pesticides in Organically Managed Agricultural Soils-the Ghost of a Conventional Agricultural Past? *Environ. Sci. Technol.*, 55, pp. 2919-2928, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06405>
- Ryschawy J., Martin G., Moraine M., Duru M., Théron O. (2017) Designing crop-livestock integration at different levels: Toward new agroecological models? *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 108, pp. 5-20, <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9815-9>
- Sauvadet M., Trap J., Damour G., Plassard C., Van den Meersche K., Achard R., Allinne C., Autfray P., Bertrand I., Blanchart E., Deberdt P., Enock S., Essobo J.D., Freschet G.T., Hedde M., de Melo Virginio Filho E., Rabary B., Rakotoarivelo M., Randriamanantsoa R., Rhino B., Ripoché A., Rosalie E., Saj S., Becquer T., Tixier P., Harmand J.M. (2021). Agroecosystem

- diversification with legumes or non-legumes improves differently soil fertility according to soil type. *Sci. Total Environ.*, 79, 148934, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148934>
- Seitz S., Goebes P., Puerta V.L., Pujol Pereira E.I., Wittwer R., Six Y., van der Heijden M.G.A., Scholten T. (2019). Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. *Agron. Sustain. Dev.*, 39, 1, <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0545-z>
- Seyni Bodo B., Morvan X., Malam Issa O., Tidjani Adamou D., Ambouta Karimou J.M., Marin B., Ponthieu M., Fronteau G. (2019). Connaissance locale de la variabilité de surface du sol et des contraintes associées pour la production du niébé en zone sahélienne du Niger, *Etude et Gestion des Sols*, 26, pp. 65-79, <https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2019/06/EGS-2019-26-SeyniBodo-65-79.pdf> consulté le 22 avril 2022
- Slocum N., Elliot J., Heesterbeek S., Lukensmeyer C.J. (2006). *Méthodes participatives : un guide pour l'utilisateur*. Bruxelles Fondation du roi Baudouin, 201 p.
- Tchamitchian M., Penvern S., Cresson C., Fourrié L., Taupier-Letage B., Clément R., Abecassis J. (2017). A methodology to go from stakeholder's expectations to research questions: implementation on organic food processing. 19. Organic World Congress, Nov 2017, New Delhi, India. (hal-01837484)
- Thérond O., Duru M., Roger-Estrade J., Richard G. (2017). A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 21, <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0429-7>
- Vertès F., Delaby L., Klumpp K., Bloor J. (2019). C-N-P Uncoupling in Grazed Grasslands and Environmental Implications of Management Intensification. In: Lemaire G., Carvalho P.C.D.F., Kronberg S., Recous S. (Eds.), *Agroecosystem Diversity: Reconciling Contemporary Agriculture and Environmental Quality*. Elsevier, Academic Press, pp. 15-34
- Vincent-Caboud L. (2020). *Semis direct sous couvert végétal sans herbicide : conception, expérimentation et évaluation conjointes d'itinéraires techniques entre praticiens et chercheurs*. Thèse de doctorat. Paris : Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France. <http://www.theses.fr/s212489> consulté le 22 avril 2022
- Walter C., Bispo A., Chenu C., Langlais A., Schwartz C. (2015). Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. *Cahiers Demeter*, pp. 53-68, halshs-01137484

