

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université
le 31 janvier 2025

Eloïse Mason

Vers des sols sains : de la surveillance des sols aux sciences participatives

Discipline

Sciences de l'environnement

Spécialité

Géosciences

École doctorale

ED 251 – Sciences de l'environnement

Laboratoire/Partenaires de recherche

INRAE - Institut national de recherche
pour l'agriculture, l'alimentation et
l'environnement

Composition du jury

Isabelle COUSIN	Rapporteuse
Directrice de recherche INRAE Info&Sols	
Sylvain SOUCHAUD	Rapporteur
Directeur de recherche IRD PALOC	
Luboš BORUVKA	Examineur
Professeur Czech University of Life Sciences Prague	
Laure MALLERET	Examinatrice
Maîtresse de conférences AMU LCE	
Flavien POINÇOT	Examineur
Ingénieur ACTA	
Samuel ROBERT	Examineur
Directeur de recherche AMU ESPACE	
Catherine KELLER	Présidente de jury
Professeure AMU CEREGE	
Sophie CORNU	Directrice de thèse
Directrice de recherche INRAE CEREGE	

AFFIDAVIT

Je soussigné, Eloïse Mason, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Sophie Cornu, dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Paris, le 22 novembre 2024



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

LISTE DE PUBLICATIONS ET PARTICIPATION AUX CONFERENCES

1) Liste des publications réalisées dans le cadre du projet de thèse :

• Articles publiés

1. Mason, E., Gascuel-Odoux, C., Aldrian, U., Sun, H., Miloczki, J., Götzinger, S., Burton, V.J., Rienks, F., Di Lonardo, S., & Sandén, T. (2024). Participatory soil citizen science: An unexploited resource for European soil research. *European Journal of Soil Science*, e13470. <https://doi.org/10.1111/ejss.13470>
2. Mason, E., Cornu, S., & Chenu, C. (2024). Point de vue des acteurs sur l'accès à la connaissance sur les sols en France. Quelles améliorations possibles ? *Étude et Gestion des Sols*, 31, pp.123-140. (hal-04487729)
3. Mason, E., Cornu, S., & Chenu, C. (2023). Stakeholders' point of view on access to soil knowledge in France. What are the opportunities for further improvement? *Geoderma Regional*, 35, e00716. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00716>
4. Mason, E., Bispo, A., Matt, M., Helming, K., Rodriguez, E., Lansac, R., Carrasco, V., Rafiul, M., Verdonk, L., Prokop, G., Wall, D., Francis, N., Laszlo, P., & Löbmann, M. (2023). Sustainable soil and land management: a systems-oriented overview of scientific literature. *Frontiers in Soil Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1268037>
5. Mason, E., Chavrit, D., Héliès, F., Jolivet, C., Arrouays, D., & Bispo, A. (2023). Bilan des 20 premières années des productions scientifiques du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), *Étude et Gestion des Sols*, 30, 307-322. (hal-04548899)

• Articles soumis

1. Mason, E., Cornu, S., Froger, C., Saby, N.P.A, & Chenu, C. (2024). Scientific indicators and stakeholders' perceptions on soil threats in France: how do they compare? Article soumis pour publication.

• Articles en préparation

1. Mason, E., Cornu, S., Arrouays, D., Fantappiè M., Jones, A., Götzinger, S., Spiegel, H., Oorts, K., Chartin, C., Borůvka, L., Pihlap, E., Putku, E., Heikkinen, J., Boulonne, L., Poeplau, C., Marx, M., Tagliaferri, E., Vinci, I., Leitans, L., Armolaitis, K., van Egmond, F., Kobza, J., Wetterlind, J., Drobnik, T., Hirte, J., & Bispo, A. (2025). Monitoring systems of agricultural soils across Europe in regards of the upcoming European Soil Monitoring Law. Article en préparation.

• Policy brief

1. Mason, E., Froger, C., Bispo, A., Fantappiè, M., Hessel, R., Van Egmond, F., Wetterlind, J., Smerczak, B., Bakacsi, Z., & Chenu, C. (2023). Policy brief on soil monitoring systems: challenges / recommendations towards harmonization. <https://doi.org/10.17180/RVXN-JA42>. (hal-04299599v2)

2) Participation aux conférences au cours de la période de thèse :

- **Présentation orale**

1. Mason, E., Cornu, S., Froger, C., Saby, N., & Chenu, C. (2024). Scientific indicators and stakeholders' perceptions on soil threats in France: how do they compare? EJP SOIL Annual Science Days & General Meeting, EJP SOIL consortium, Jun 2024, Vilnius, Lithuania. (hal-04661384)

- **Poster de conférence**

1. Mason, E., Matt, M., Löbmann, M., Helming, K., Rodriguez, E., Lansac, R., Carrasco, V., Rafiul, M., Verdonk, L., Prokop, G., Wall, D., Francis, N., Laszlo, P., & Bispo, A. (2023). Gestion durable sols : une vue d'ensemble de la littérature scientifique. 16. Journées d'Etude des Sols, Jun 2023, Dijon, France. (hal-04145748)
2. Mason, E., Matt, M., Löbmann, M., Helming, K., Rodriguez, E., Lansac, R., Carrasco, V., Rafiul, M., Verdonk, L., Prokop, G., Wall, D., Francis, N., Laszlo, P., & Bispo, A. (2022). Existing R&I knowledge on sustainable soil and land management: a comprehensive overview. 22nd World Congress of Soil Science, August 2022, Glasgow, Royaume-Uni

RESUME

Vers des sols sains : de la surveillance des sols aux sciences participatives

La santé des sols, essentielle à la fourniture de services écosystémiques, se heurte aux menaces qui pèsent sur les sols dans un contexte de changements environnementaux et socio-économiques rapides. Bien que de nombreuses connaissances existent sur ces enjeux, il reste à déterminer comment celles-ci se répartissent au sein du cycle des connaissances, de leur production à leur application. Ce travail vise, dans un premier temps, à établir un état des lieux de la répartition de ces connaissances tout au long de ce cycle, avant de se concentrer spécifiquement sur les aspects d'harmonisation, de transfert et d'application des connaissances. Un chapitre est ainsi consacré aux méthodes de surveillance de la santé des sols. Il compare les systèmes de surveillance des sols de plusieurs pays européens au regard de la directive sur la surveillance des sols, en prenant en compte les méthodes d'échantillonnage et les paramètres/indicateurs mesurés, tout en explorant les opportunités d'harmonisation au niveau européen. Un exemple concret de mise en œuvre d'un système national de surveillance est fourni par une étude approfondie du système français, le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). En outre, ce chapitre compare les indicateurs scientifiques utilisés pour évaluer les menaces pesant sur les sols à la perception des acteurs locaux, soulignant les convergences et divergences entre ces deux approches, afin d'évaluer la possibilité d'utiliser la perception comme un indicateur parmi d'autres. Un autre chapitre, basé sur des enquêtes menées auprès de six catégories d'acteurs, explore les limites du transfert de connaissances et identifie des opportunités d'amélioration, avec la co-crédation comme stratégie clé pour renforcer ce transfert. Enfin, un dernier chapitre analyse le recours à une forme de co-crédation, les sciences participatives, dans la recherche sur les sols agricoles en Europe. Cette approche permet d'aborder simultanément l'ensemble du cycle des connaissances. Ce chapitre identifie, à partir des projets passés et en cours, les principaux facteurs de réussite et propose des recommandations pour renforcer les sciences participatives dans le domaine de la santé des sols. Ainsi, la co-crédation apparaît comme une solution prometteuse aux défis liés au transfert de connaissances et à la surveillance des sols, en comblant le fossé entre les indicateurs scientifiques et les perceptions des acteurs, tout en favorisant la mise en œuvre d'une gestion durable des sols, adaptée aux spécificités locales. L'ensemble de cette thèse s'appuie sur une double approche, combinant enquêtes et synthèses de la littérature.

Mots-clés

Co-crédation, Consultation multi-acteurs, Gestion durable, Indicateurs des sols, Système de surveillance des sols, Transfert de connaissances

ABSTRACT

Towards healthy soils: from soil monitoring to participatory science

Soil health, essential for the provision of ecosystem services, faces significant threats in the context of rapid environmental and socio-economic changes. Although substantial knowledge exists on these issues, it remains to be determined how this knowledge is distributed within the knowledge cycle, from its production to its application. This work first aims to assess the distribution of this knowledge throughout the cycle, before focusing specifically on the aspects of knowledge harmonization, transfer, and application. One chapter is dedicated to soil health monitoring methods. It compares the soil monitoring systems of several European countries in regards to the Soil Monitoring Law, considering sampling methods and the parameters/indicators measured, while exploring opportunities for harmonization at the European level. A concrete example of the implementation of a national monitoring system is provided by an in-depth study of the French system, the Soil Quality Monitoring Network (RMQS). Furthermore, this chapter compares the scientific indicators used to assess soil threats with local stakeholders' perceptions, highlighting the convergences and divergences between these two approaches to evaluate the possibility of using perception as an additional indicator. Another chapter, based on surveys conducted among six categories of stakeholders, explores the limitations of knowledge transfer and identifies opportunities for improvement, with co-creation highlighted as a key strategy to enhance this transfer. Finally, the last chapter analyzes the use of a form of co-creation, citizen science, in agricultural soil research in Europe. This approach allows for the simultaneous consideration of the entire knowledge cycle. This chapter identifies, based on past and current citizen science projects, the main success factors and offers recommendations to strengthen citizen science in the field of soil health. Thus, co-creation emerges as a promising solution to the challenges of knowledge transfer and soil monitoring, bridging the gap between scientific indicators and stakeholders' perception, while promoting the implementation of sustainable soil management practices tailored to local specificities. The entire thesis is based on a dual approach that combines surveys with literature reviews.

Keywords

Co-creation, Multi-stakeholder consultation, Sustainable management, Soil indicators, Soil monitoring system, Knowledge transfer

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de thèse, Sophie Cornu, dont le soutien indéfectible et l'engagement ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail. Je te remercie sincèrement d'avoir cru en moi dès le début et de m'avoir guidé avec patience, rigueur et bienveillance à chaque étape du processus. Ta disponibilité, même en période chargée, et le temps précieux que tu as consacré à répondre à mes questions et à m'orienter avec tes conseils avisés ont été pour moi un véritable pilier. Merci également pour tes plans toujours pertinents et ta capacité à m'aider à voir plus clair dans les moments de doute. Ta confiance et ton enthousiasme ont été des sources d'inspiration constantes, et cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans ton accompagnement.

Je tiens à remercier chaleureusement Antonio Bispo pour m'avoir permis de prendre part activement au projet SMS (Soil Mission Support), tout en m'offrant une grande flexibilité et un encadrement de qualité. Je remercie également Antonio de m'avoir donné l'opportunité de partir en Autriche, une chance qu'il n'était pas tenu de m'offrir. Ce séjour, prévu pour quelques mois, s'est finalement transformé en une expérience d'un an et demi. C'est là que j'ai découvert la possibilité de la thèse par VAE, une idée qui m'a ensuite trotté plusieurs mois dans la tête. Cette expérience autrichienne m'a enrichi, tant sur le plan personnel que professionnel. Je remercie les instituts autrichiens BOKU, AGES et UBA de m'avoir accueilli à bras ouverts.

Un grand merci également à Claire Chenu, dont le soutien scientifique et l'aide précieuse dans la gestion des aspects administratifs, en particulier pour la VAE, ont été essentiels à la réalisation de cette thèse. Son appui a été déterminant pour la réalisation de l'enquête nationale intégrée dans cette thèse. Cette enquête, qui n'était pas prévue au départ dans le cadre du programme européen EJP SOIL, a considérablement enrichi ma thèse, et c'est grâce à son engagement et à sa confiance que cette opportunité a pu voir le jour.

Rien de ce travail n'aurait été possible sans mes collègues scientifiques et administratifs, ainsi que mes coauteurs de l'INRAE et des instituts de recherche européens, dont je tiens à remercier chacun pour leur soutien et leurs échanges enrichissants. Un merci tout particulier à Taru Sanden, Camille Imbert, Claire Froger, Pierre Benoit, Gundula Prokop, et Peter Tramberend, pour la qualité de nos échanges, tant scientifiques qu'humains. Je tiens à remercier M. Brossard (IRD), S. Raous (AFES), F. Poinçot (ACTA, Rnest), I. Letessier (SIGALES), L. Ranjard (INRAE), B. Sanchez (INIA), S. Mason (agricultrice), et R. Mason (conseillère agricole) pour leur aide précieuse dans l'amélioration du design, le test et la diffusion des questionnaires, ainsi que tous les répondants pour le temps qu'ils ont consacré à y répondre et pour leurs précieuses contributions.

Je remercie enfin tous les membres du jury pour avoir accepté de se prêter à l'évaluation de ce manuscrit, qui diffère quelque peu d'une thèse classique.

Ce travail a bénéficié du soutien financier de l'Union européenne dans le cadre de son programme Horizon 2020 pour la recherche et l'innovation (Grant Agreements n° 101000258 et 862695).

TABLE DES MATIERES

Affidavit	2
Liste de publications et participation aux conférences.....	4
Résumé	6
Abstract	7
Remerciements	8
Table des matieres	9
Table des figures	11
Table des tableaux	13
Introduction	14
Chapitre 1 : Approches méthodologiques	23
1.1. Les enquêtes auprès des acteurs par questionnaires en ligne.....	24
1.1.1. Conception et stratégies de diffusion des questionnaires	24
1.1.2. Représentativité des réponses obtenues	26
1.2. La revue systématique, synthèse des connaissances scientifiques.....	26
1.2.1. L'identification et la sélection de corpus de littérature	27
1.2.2. L'analyse textuelle, une approche permettant une analyse du contenu de corpus volumineux.....	27
Chapitre 2 : Etat des lieux des connaissances sur les menaces et les services écosystémiques structuré selon le cycle des connaissances	29
2.1. Sustainable soil and land management: a systems-oriented overview of scientific literature	30
2.2. Conclusion du chapitre 2	47
Chapitre 3 : Harmonisation, organisation et stockage des données pour la surveillance de la santé des sols	49
3.1. Introduction du chapitre 3	50
3.2. Monitoring systems of agricultural soils across Europe in regards of the upcoming European Soil Monitoring Law	51
3.3. Bilan des 20 premières années des productions scientifiques du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS).....	65
3.4. Scientific indicators and stakeholders' perceptions on soil threats in France: how do they compare?	82
3.5. Conclusion du chapitre 3	98
Chapitre 4 : Transfert des connaissances sur les sols vers les différents acteurs sur les sols	100
4.1. Point de vue des acteurs sur l'accès à la connaissance sur les sols en France. Quelles améliorations possibles ?.....	101
Chapitre 5 : La co-crédation, une approche innovante pour une gestion durable des sols	117
5.1. Introduction du chapitre 5	118

5.2. Participatory soil citizen science: An unexploited resource for European soil research.....	120
5.3. Conclusion du chapitre 5	139
Conclusion et perspectives	140
Bibliographie	145
Annexes	169
Annexe A.....	170
Annexe B.....	172
Annexe C.....	174
Annexe D.....	179
Annexe E	189
Annexe F	192

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Nombre de publications par an citant différents concepts liés aux sols	15
Figure 2 : Cadre conceptuel des interactions pour la santé des sols.....	16
Figure 3 : Cycle des connaissances divisé en quatre phases interdépendantes	20
Figure 4 : Cadre conceptuel des interactions, adapté et structuré en fonction des chapitre. ...	22
Figure 5: The systems-oriented analytical framework for the literature search and analysis .	33
Figure 6: Heat map indicating the abundance of identified scientific literature for each knowledge domain within each societal challenge.	36
Figure 7: Number of scientific articles per knowledge domain and societal challenge.....	36
Figure 8: Cluster map of the main terms used in the scientific articles	37
Figure 9: Numbers of published scientific articles per year per societal challenges.....	38
Figure 10: Concentration of published soil related scientific articles per country for all 8 related societal challenges.....	40
Figure 11 : Heat map indiquant la répartition des connaissances sur la lutte contre les différentes menaces et les services écosystémiques rendus par les sols.	48
Figure 12: Geographical distribution of SMSs included in the survey	54
Figure 13: Distribution of monitored km ² per sampling sites across SMSs.....	57
Figure 14: Soil sampling depth intervals by country and land use for SMSs	58
Figure 15: Similarities of Soil Monitoring Systems (SMSs) with the Soil Monitoring Law (SML) across sampling strategies, parameters monitored, methods, and data accessibility ...	61
Figure 16 : Schéma indiquant les étapes nécessaires à la détermination des 3 corpus utilisés dans cette étude à partir de la bibliothèque RMQS.....	69
Figure 17 : Graphique représentant le nombre de publications par an par langue.	71
Figure 18 : Carte de réseau du corpus des 64 articles publiés en français.	72
Figure 19 : Carte de réseau du corpus des 172 articles publiés en anglais.....	74
Figure 20 : Carte représentant les interconnectivités entre les 60 principaux auteurs.	75
Figure 21 : Schéma représentant les principaux termes utilisés dans les corpus anglais et français.	77
Figure 22: Spatial comparison of the number of stakeholders and farmers working at the local scale.....	86
Figure 23: Proportion of the various stakeholder categories that consider the different soil threats as important at their working scale, considering all scales from local to national.	88
Figure 24: Maps representing per department the percentage of stakeholders perceiving a soil threat as important and the scientific indicators for the different soil threats	90
Figure 25: Proportion of different stakeholder categories in departments where compaction or contamination is perceived.....	95
Figure 26 : Répartition des répondants en pourcentage par catégorie d'acteurs et répartition par type d'autorité publique.	106

Figure 27 : Comparaison entre les réponses à notre enquête et les statistiques nationales françaises concernant le type d'agriculture pratiqué	107
Figure 28 : Comparaison entre les réponses à notre enquête et les statistiques nationales françaises concernant le type de production des agriculteurs.	107
Figure 29 : Deux premières composantes de l'AFC réalisée sur le niveau de connaissances sur les sols et l'accès à la connaissance sur les sols des différentes catégories d'acteurs	109
Figure 30 : Vision des acteurs sur l'adéquation des connaissances à leurs besoins et qualité du partage des connaissances sur les sols.....	109
Figure 31 : Sources utilisées pour accéder à la connaissance sur les sols par les différentes catégories d'acteur.....	110
Figure 32 : Deux premières composantes de l'AFC réalisée sur les sources utilisées pour accéder aux connaissances sur les sols ainsi que sur l'adéquation entre ces connaissances et les besoins des acteurs..	110
Figure 33 : Principaux freins à l'accès aux connaissances sur les sols.....	111
Figure 34 : Principales possibilités d'améliorer l'accès aux connaissances sur les sols.	112
Figure 35 : Deux premières composantes de l'AFC réalisée sur les réseaux d'échanges à renforcer selon les différentes catégories d'acteurs..	112
Figure 36 : Représentation des concepts de co-création, de sciences participatives et de Living Labs.	119
Figure 37: Description of the citizen science project as reported by coordinators.	125
Figure 38: Soil health data generated by the citizen science projects.	126
Figure 39: The tasks of citizen scientists, project coordinators and scientists in the citizen science projects.	128
Figure 40: Benefits for scientists and citizen scientists in taking part in CS projects.....	128
Figure 41: Reported evaluation of the CS projects by the coordinators.....	130
Figure 42: Reported ways to indicate the success of a project.....	130
Figure 43: Important prerequisites reported for coordinators' citizen science work and for citizen science novices to conduct a citizen science project in the future.....	131

TABLE DES TABLEAUX

Table 1: Overview of the main terms used per societal challenge and the percentage of articles containing them.	37
Table 2: Overview of the main studied regions per societal challenge based on the desk analysis.	39
Table 3: Overview of the main studied land use and management practices per societal challenge based on the desk analysis.	39
Table 4: Description of the reported SMSs	56
Table 5: Parameters recommended by the SML and number of SMS measuring them.	60
Table 6: Overview of methodologies used to measure parameters	60
Tableau 7 : Nombre de publications qui contiennent les principaux termes utilisés dans le corpus en français.	71
Tableau 8 : Nombre de publications qui contiennent les principaux termes utilisés dans le corpus en anglais	73
Tableau 9 : Principales revues dans lesquelles publient les auteurs.	76
Tableau 10 : Classement des articles selon le nombre de fois qu'ils ont été cités.	76
Table 11: Overview of scientific indicators used to map the different soil threats.	89
Table 12: Distribution of the percentages per department of stakeholders - working at local scale - perceiving a given threat as important	91
Table 13: Assessed SOC concentrations in 2000-2004 in the topsoil for the different thirds of stakeholders' perception of SOC loss	96
Tableau 14 : Comparaison entre les réponses à notre enquête et les statistiques nationales françaises concernant l'âge et le niveau de formation des agriculteurs.	107
Tableau 15 : Répartition par département du nombre d'acteurs ayant répondu.	108
Table 16: Ten principles of citizen science	127

INTRODUCTION

Sans sol, la vie sur terre ne serait pas possible, car celui-ci compose « la matière stratifiée à la surface de la terre, qui résulte de processus chimiques et biologiques et de l'organisation physique des minéraux et de la matière organique, et qui soutient les écosystèmes terrestres et l'humanité » (McBratney & Hartemink, 2024). Pour autant, les sols ont longtemps été considérés comme un simple support inerte pour les cultures. Ils sont néanmoins désormais considérés par la communauté scientifique notamment, à travers une diversité de disciplines, comme des écosystèmes riches et complexes, essentiels au maintien de la biodiversité, à la régulation climatique et à la production alimentaire dont le rôle est crucial.

Evolution depuis le XX^{ième} siècle du dialogue science-politiques publiques sur les sols

Bien que la science des sols ait émergé à la fin du XIX^{ième} siècle avec des pionniers tels que Vassili Dokoutchaïev, son influence sur les politiques publiques est restée longtemps marginale. À ses débuts, la science des sols s'est essentiellement concentrée sur la compréhension des processus physiques et chimiques des sols, principalement en lien avec l'agriculture. Les sols ont longtemps été principalement perçus à travers le prisme de leur productivité agricole (Mizuta et al., 2021), avec un accent mis sur leur capacité à soutenir les cultures et à maximiser les rendements. Ce manque de considération pour les sols est devenu tragiquement évident lors de la crise de la Dust Bowl dans les années 1930 aux États-Unis, lorsque des pratiques agricoles intensives ont conduit à une grave érosion des sols, provoquant des sécheresses catastrophiques et des déplacements massifs de populations (Schubert et al., 2004). En réponse, des politiques de conservation des sols, telles que le Soil Conservation Act de 1935, ont été instaurées aux États-Unis, marquant un tournant décisif dans l'intégration de la gestion durable des sols dans les politiques publiques.

Les sciences des sols ont progressivement élargi leur champ d'étude, avec l'émergence au fil du temps des concepts tels que la fertilité des sols, qualité des sols et santé des sols dans la littérature scientifique (Figure 1). Le concept de 'soil fertility' ou 'fertilité des sols' dominait les discussions avant les années 1990, principalement dans un cadre agricole, où il était centré sur la capacité des sols à soutenir la productivité des cultures. Toutefois, à partir du milieu des années 1990, le concept de 'soil quality' ou 'qualité des sols' est apparu et a progressivement gagné en importance (Figure 1). La qualité des sols est définie comme la capacité potentielle d'un sol à fonctionner comme un système vivant dynamique, essentiel pour soutenir la productivité et la santé des plantes et des animaux, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et continuer à fournir des services écosystémiques sur le long terme (van den Elsen et al., 2022) (Figure 2). Plus récemment, au milieu des années 2010, le concept 'soil health' ou 'santé des sols' est apparu. La santé des sols a été définie par van den Elsen et al. (2022) comme "la capacité [à un temps t] d'un sol à fonctionner comme un système vivant vital, dans les limites des écosystèmes naturels ou gérés et des contraintes de l'utilisation des terres, pour soutenir la productivité et la santé des plantes et des animaux, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air et continuer à fournir des services écosystémiques à long terme sans compromettre ces services". Van den Elsen et al. (2022) considèrent la santé des sols comme un niveau particulier en deçà duquel la capacité du sol à fonctionner et à fournir des services écosystémiques est

altérée (Figure 2). L'analyse des publications scientifiques révèle une augmentation significative de l'intérêt pour la santé des sols au cours de la dernière décennie, avec une progression plus rapide que celle des recherches sur la fertilité et la qualité des sols. Cette évolution témoigne d'une transition de la recherche, autrefois principalement axée sur la production agricole, vers une approche plus holistique, considérant les sols comme des systèmes écologiques vitaux.

Cette tendance s'inscrit dans un intérêt croissant de la communauté scientifique pour les sols en général. Une recherche dans la base de données Scopus, effectuée le 21 novembre 2024, le confirme. Alors que 517 943 articles scientifiques ont été publiés depuis 1900 en anglais contenant le terme "soil" dans leur titre, les publications spécifiques aux sols ont augmenté de 150 % entre 2005 et 2017, comparé à une augmentation de 83 % pour l'ensemble des domaines scientifiques. Cette croissance illustre un engouement accru pour la recherche sur les sols, bien au-delà de la tendance générale dans le domaine scientifique.

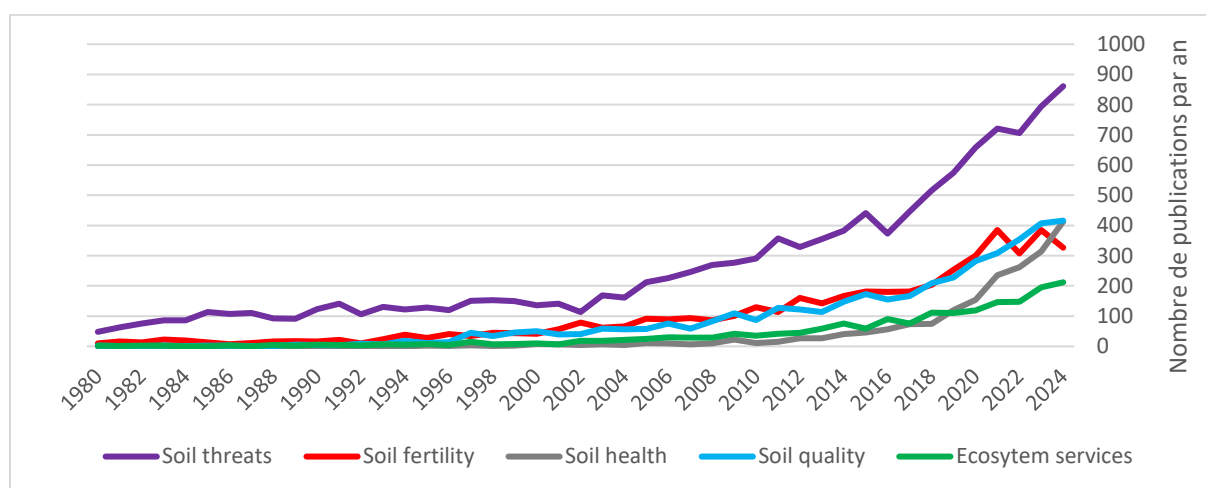


Figure 1 : Nombre de publications par an citant différents concepts liés aux sols dans leur titre depuis 1980, dans les revues indexées sur Scopus. Les mots-clés de recherche utilisés sont en **Annexe A**. Les concepts représentés sont : soil threats (menaces sur les sols), soil fertility (fertilité des sols), soil health (santé des sols), soil quality (qualité des sols) et ecosystem services (services écosystémiques).

De fait, l'évolution au fil du temps des concepts de fertilité, de qualité et de santé des sols souligne l'importance de la santé des sols non seulement pour la production agricole, mais aussi pour la fourniture de nombreux services écosystémiques (Lehmann et al., 2020). Les services écosystémiques représentent les bénéfices directs et indirects des écosystèmes au bien-être humain (Figure 2). Parmi eux, les services écosystémiques du sol se distinguent en tant que sous-ensemble spécifique, englobant les contributions des sols par le biais de leurs propriétés, processus et fonctions chimiques, physiques et biologiques (Paul et al., 2021). Dominati et al. (2014) ont proposé une classification des services écosystémiques du sol en quatre grands groupes : (i) les services d'approvisionnement (fourniture de nourriture, fibres et carburant) ; (ii) les services de régulation (qualité de l'air, stockage du carbone, filtrage des nutriments et des contaminants, et atténuation des inondations) ; (iii) les services de soutien (formation des sols et cycle des nutriments) ; et (iv) les services culturels (loisirs/écotourisme, valeurs spirituelles et esthétique). Toutefois, malgré l'importance cruciale de ces services écosystémiques fournis par les sols, ces derniers sont de plus en plus menacés.

Les menaces qui pèsent sur les sols sont des processus susceptibles de les dégrader, réduisant ainsi leur capacité à fournir des services écosystémiques (van den Elsen et al., 2022) (Figure 2). À l'échelle mondiale, au moins un tiers des sols sont considérés comme modérément à fortement dégradés (FAO & ITPS, 2015). En Europe, 60 à 70 % des sols européens sont considérés comme dégradés, ce qui souligne les nombreuses menaces qui pèsent sur cette ressource (Veerman, 2023). Kibblewhite (2012) a identifié huit principales menaces sur les sols : l'érosion, l'artificialisation, la compaction, la perte de carbone organique du sol (SOC), la contamination, la salinisation, la désertification et la perte de biodiversité du sol. Ces menaces varient considérablement d'un pays à l'autre et d'une région à l'autre de l'Europe, en raison de la diversité de l'utilisation des terres, des systèmes agricoles, des types de sols et des zones environnementales en Europe (Hessel et al., 2022).

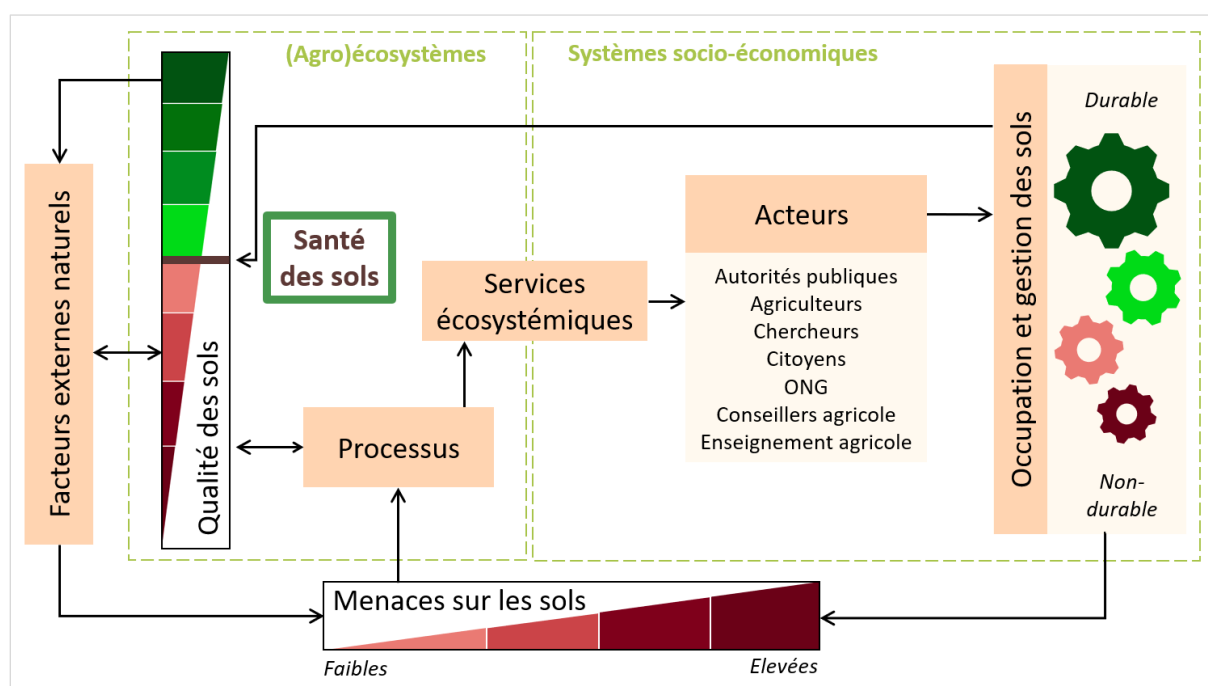


Figure 2 : Cadre conceptuel des interactions pour la santé des sols (adapté de van den Elsen, 2021).

Les pratiques de gestion durable des sols jouent un rôle crucial dans la mitigation des menaces pesant sur les sols (Strauss et al., 2023), et contribue également à fournir des services écosystémiques essentiels (Helming et al., 2018a ; Tamburini et al., 2020) (Figure 2). En effet, ces pratiques favorisent la conservation de la matière organique du sol, améliorent sa structure et sa capacité à retenir l'eau, réduisant ainsi les risques d'érosion et de désertification, tout en diminuant la pollution du sol et en soutenant les écosystèmes locaux (Kibblewhite et al., 2008 ; Jaworski et al., 2024). Ces pratiques soutiennent également des services écosystémiques tels que la régulation du climat par le stockage du carbone, la filtration de l'eau, et la protection de la biodiversité en fournissant des habitats pour les organismes du sol (Richter et al., 2024). Les bénéfices pour la santé des sols de différentes pratiques de gestion durable des sols ont été décrits dans la littérature, telles que l'utilisation de couverts végétaux (Blanco-Canqui et al., 2022), l'agriculture de conservation (Carceles Rodríguez et al., 2022), l'utilisation de compost organique (Wright et al., 2022), ou encore l'agroforesterie (Jose, 2009 ; Dollinger & Jose, 2018).

La base de données WOCAT (World Overview of Conservation Approaches and Technologies) compile et partage un inventaire mondial des pratiques de gestion durable des sols et de la conservation des terres. Cet outil en ligne, accessible au grand public et aux experts, permet de documenter, évaluer et diffuser des méthodes efficaces de conservation des sols et de l'eau à travers le monde (WOCAT, 2023). Pour assurer une efficacité optimale, les pratiques de gestion doivent être adaptées aux caractéristiques locales spécifiques, tant en termes de pédoclimat que de contextes socio-économiques (Helming et al., 2018a).

Sur le plan politique, l'évolution des politiques publiques européennes sur les sols a suivi ces changements conceptuels. Contrairement à l'eau ou à l'air, les sols n'ont pas fait l'objet de débats législatifs à l'échelle de l'Union Européenne avant le début des années 2000. En 2006, la Commission européenne a proposé une première directive sur la protection des sols, qui visait à établir des règles pour lutter contre la dégradation des sols dans l'UE. Cependant, cette proposition a rencontré une forte opposition de la part de plusieurs États membres, qui redoutaient une surcharge réglementaire et des contraintes supplémentaires pour leurs secteurs agricoles. Cette réticence a conduit à l'abandon de la directive en 2014, laissant les sols sans cadre législatif harmonisé à l'échelle européenne pendant plus d'une décennie. Ces dernières années, la dynamique a toutefois évolué avec la mise en œuvre par la Commission européenne d'une série de politiques axées sur la santé des sols. L'introduction du pacte vert pour l'Europe en 2020 a fait de la protection des sols une priorité essentielle de l'agenda politique. Depuis lors, plusieurs stratégies majeures ont été adoptées, notamment la stratégie de l'UE en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030, la stratégie "Farm to Fork", le plan d'action "zéro pollution", et la stratégie de l'UE en matière d'adaptation au changement climatique. Dans le cadre du pacte vert pour l'Europe, la Stratégie de l'UE pour la protection des sols à l'horizon 2030 (European Commission, 2021a) a été lancée. Pour soutenir cet objectif, la Commission européenne a proposé une directive relative à la surveillance et à la résilience des sols en 2023 (European Commission, 2023). Cette directive, connue sous le nom de « loi sur la surveillance des sols » (SML), vise à établir un cadre juridique permettant aux États membres de surveiller la santé des sols. Cependant, elle n'a toujours pas été adoptée à ce jour.

Défis de la surveillance des sols

L'évaluation de la santé des sols, des menaces qui les affectent et des services écosystémiques qu'ils fournissent nécessite une surveillance régulière, un aspect particulièrement mis en avant par les politiques publiques. En effet, les menaces qui pèsent sur les sols varient en intensité et en nature selon les échelles considérées - mondiale, nationale, régionale et locale - et peuvent entraîner des évolutions négatives irréversibles des sols sur des centaines d'années. Il est ainsi crucial de détecter ces évolutions précocement à l'aide d'indicateurs - ensembles de paramètres du sol reflétant sa capacité à fonctionner. Ces indicateurs sont des outils essentiels pour évaluer la santé des sols, les menaces qui pèsent sur eux, ainsi que les services écosystémiques qu'ils fournissent, en s'appuyant sur leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques.

Ces indicateurs, lorsqu'ils sont intégrés dans un système de surveillance, permettent de suivre l'évolution de la santé des sols sur le long terme afin de soutenir des décisions politiques judicieuses. Un système de surveillance bien conçu recueille régulièrement des données robustes et représentatives à l'aide de méthodes de mesures. La mise en place de systèmes de surveillance de l'état de la santé des sols figurait parmi les quatre actions urgentes proposées par FAO & ITPS (2015) pour lutter contre la dégradation des sols. La plupart des États membres de l'Union européenne ont mis en place et conçu un ou plusieurs systèmes de surveillance des sols (SMS) sur leur territoire, bien que les spécificités de ces systèmes diffèrent considérablement d'un État membre à l'autre (Bispo et al., 2021). L'harmonisation des systèmes de surveillance est essentielle pour une évaluation cohérente de la santé des sols à l'échelle européenne, notamment en vue de la future loi européenne sur la surveillance des sols (SML). Dans quelle mesure les systèmes de surveillance des sols des États membres reflètent-ils les principes définis dans la SML ? Et quelles mises à jour pourraient être nécessaires pour renforcer leur contribution à un cadre européen unifié de surveillance des sols ?

Toutefois, la communauté scientifique ne parvient toujours pas à s'accorder sur les indicateurs les plus pertinents pour évaluer les menaces pesant sur les sols. Reyes-Rojas et al. (en préparation) ont mis en évidence une grande diversité d'indicateurs utilisés pour chaque menace, ce qui pourrait s'expliquer par l'absence de consensus sur les définitions des indicateurs, les méthodes d'analyse et d'échantillonnage, ainsi que les valeurs seuils, ou encore par la complexité ou l'indisponibilité des données sur les sols, rendant le suivi à l'échelle locale difficile (European Environmental Agency, 2023). En revanche, certaines études ont montré une corrélation entre les indicateurs scientifiques et la perception des agriculteurs sur l'état de la fertilité des sols (Nord & Snapp, 2020) ou encore le niveau de carbone organique des sols (Hijbeek et al., 2017). Comme certains acteurs disposent d'une bonne connaissance de l'état des sols à l'échelle à laquelle ils travaillent (Mason et al., 2023a), leur perception des menaces pesant sur les sols pourrait servir d'indicateur complémentaire aux indicateurs scientifiques existants. Cela soulève les questions suivantes : dans quelle mesure peut-on considérer la perception des acteurs comme un indicateur pertinent ? Et comment cette perception peut-elle compléter les indicateurs scientifiques existants pour mieux appréhender les enjeux locaux, alerter efficacement les agriculteurs et les autorités publiques, et ainsi faciliter la mise en place de mesures préventives ou de réhabilitation adaptées, telles que les pratiques de gestion durable des sols ?

L'importance du transfert de connaissances en sciences du sol

Heller et al. (2024) ont mené une consultation pour évaluer le degré d'adoption des pratiques de gestion durable des sols en Europe. Les résultats montrent que l'adoption de la plupart de ces pratiques était faible ou inégale à travers l'Europe. Pourtant, leur adoption est essentielle pour contribuer de manière significative à l'amélioration de la santé des sols (Helming et al., 2018a). L'adoption des pratiques de gestion durable des sols ne sera effective qu'avec une sensibilisation accrue et prise de conscience de l'importance de la santé des sols et des impacts des pratiques non durables (Bouma, 2019). En effet, selon MacEwan et al. (2017), près de la moitié de l'humanité vit déconnectée de l'environnement naturel. Cela suggère qu'une grande partie encore plus forte de la population mondiale pourrait également être déconnectée du sol, compartiment généralement le moins bien connu des écosystèmes, sans doute du fait de son

invisibilité (situé sous nos pieds) (Pino et al., 2022). Le transfert des connaissances en sciences du sol est donc crucial pour la société car il peut transformer la perception et les compétences des acteurs, en les incitant à adopter des pratiques de gestion durable des sols (Hou, 2020a). Bien que la sensibilisation de l'ensemble de la population soit essentielle à long terme, les principaux acteurs concernés par la gestion des sols, tels que les agriculteurs, les décideurs politiques, les conseillers agricoles, et les chercheurs, constituent une cible prioritaire. En effet, ces acteurs ont un impact direct sur la santé des sols, et leur engagement dans des pratiques durables est fondamental pour initier des changements concrets (Figure 2). Cependant, le transfert de connaissances entre ces acteurs rencontre souvent des limites significatives. Ces obstacles peuvent inclure des différences de langage et de perspectives, des décalages entre les savoirs théoriques et pratiques, ainsi que des difficultés à adapter les recommandations scientifiques aux réalités locales (Vanino et al., 2023). Le transfert de connaissances dans l'agriculture a traditionnellement suivi un modèle linéaire, où les agriculteurs sont de simples récepteurs passifs (Dockès et al., 2019). L'amélioration du transfert de connaissances peut jouer un rôle essentiel dans l'adoption des nouvelles technologies (Feliciano et al., 2014). Vanino et al. (2023) ont mené une consultation auprès d'acteurs dans 20 pays européens afin d'identifier et de hiérarchiser les principaux freins à l'accès aux connaissances sur les sols et les possibilités d'améliorations au niveau national et européen. Les conclusions de l'étude suggèrent que, dans toute l'Europe, le renforcement des réseaux d'échanges pourrait contribuer à l'amélioration de la santé des sols. Selon Lobry De Bruyn et al. (2017), cinq groupes interconnectés doivent être impliqués : l'enseignement agricole, les autorités politiques, les chercheurs, les agents de vulgarisation et les agriculteurs. Il est effectivement essentiel que tous les acteurs impliqués collaborent étroitement (Mol & Keesstra, 2012). Cependant, comment encourager une collaboration efficace entre ces groupes d'acteurs et transformer le transfert de connaissances en un processus véritablement participatif et inclusif pour favoriser l'adoption des pratiques durables à grande échelle ?

Sciences participatives et transfert de connaissances : un nouveau paradigme pour la recherche sur les sols

Les sciences participatives sont une méthode qui implique activement une variété d'acteurs autour d'une question scientifique, par exemple dans la collecte ou l'analyse de données, afin de générer de nouvelles connaissances ou compréhensions (Haklay et al., 2021). La communauté scientifique commence à explorer et à adopter des méthodes de "co-création", où les acteurs non-scientifiques ne sont pas seulement impliqués dans la collecte et l'analyse de données, mais aussi dans la conception de projets et l'élaboration de questions de recherche (Robinson et al., 2018). Comme l'ont souligné Leino & Puumala (2021), cette approche permet de fédérer acteurs non-scientifiques (tels que les agriculteurs et autorités publiques) et scientifiques tout au long du processus de recherche. L'implication plus poussée des acteurs non-scientifiques dans la recherche scientifique présente de multiples avantages, tels que des possibilités d'apprentissage, une confiance accrue dans la recherche et des résultats de recherche plus efficaces (Bonney et al., 2016 ; Trimble & Berkes, 2013). Head et al. (2020) suggèrent ainsi que les sciences participatives pourraient jouer un rôle essentiel dans le suivi de la santé des sols en collectant de précieuses données. Pourraient-elles aussi, en impliquant directement les acteurs non-scientifiques dans le processus de recherche, offrir une solution au problème de transfert de connaissances sur les sols ?

Le rôle de la recherche dans le cycle des connaissances sur la santé des sols

La recherche joue un rôle central dans chaque phase du cycle des connaissances (Dalkir, 2005 ; Visser et al., 2019) en santé des sols (Figure 3), qui comprend quatre étapes interdépendantes :

(i) **Développement des connaissances** : cette première phase implique la recherche et la production de savoirs nouveaux, notamment sur les menaces pesant sur les sols et les indicateurs de leur santé. Ces connaissances initiales sont le socle sur lequel repose l'ensemble du cycle.

(ii) **Harmonisation, organisation et stockage** : la surveillance des sols fait partie intégrante de cette phase. En structurant les données obtenues par des systèmes de surveillance, la recherche contribue à la standardisation des indicateurs et des méthodes de collecte et de stockage des données, facilitant leur accessibilité et leur comparaison à grande échelle. Ce processus garantit que les informations sur la santé des sols soient centralisées, harmonisées et organisées pour une utilisation cohérente et adaptée aux besoins des divers acteurs.

(iii) **Partage et transfert des connaissances** : le partage des connaissances est essentiel pour transmettre les résultats de la recherche vers les acteurs de terrain. La recherche joue ici un rôle clé dans la création de mécanismes permettant aux informations de circuler au sein de réseaux multi-acteurs, facilitant ainsi une compréhension partagée et l'intégration des savoirs.

(iv) **Application des connaissances** : enfin, les connaissances doivent être mises en pratique par des actions concrètes de gestion des sols. L'application nécessite souvent des adaptations locales pour répondre aux spécificités de chaque région, faisant de la co-crédation et des sciences participatives des approches particulièrement prometteuses.

Le cycle des connaissances fournit ainsi un cadre conceptuel structurant pour renforcer la santé des sols en facilitant le passage des savoirs scientifiques de la théorie à la pratique. Dans quelle mesure les connaissances actuelles sur la santé des sols sont-elles aujourd'hui réparties au sein des différentes phases de ce cycle, de leur développement à leur application, quelles en sont les lacunes, et comment l'identification de ces lacunes peut-elle orienter une gestion durable des sols adaptée aux enjeux actuels ?



Figure 3 : Cycle des connaissances divisé en quatre phases interdépendantes : (i) développement des connaissances ; (ii) harmonisation, organisation et stockage des connaissances ; (iii) partage et transfert des connaissances ; et (iv) application des connaissances (adapté d'après Visser et al., 2019).

Objectifs et plan de la thèse

Ainsi, cette thèse, qui s'articule autour de la question centrale « Comment évaluer, préserver et promouvoir la santé des sols dans un contexte de changements rapides ? » a pour objectif d'apporter une contribution originale en adoptant un positionnement centré sur la gestion des données, le transfert des connaissances et leur application concrète. Elle se distingue par sa prise en compte de l'ensemble des phases du cycle des connaissances, depuis le développement des connaissances jusqu'à leur adoption par les acteurs.

La thèse est organisée en cinq chapitres : quatre d'entre eux explorent les différentes questions de recherche évoquées précédemment en fonction du cycle de connaissances (Figures 3 et 4), tandis qu'un chapitre est dédié à une présentation détaillée de la méthodologie adoptée.

Le **chapitre 2** vise à établir un état des lieux des connaissances, sur les menaces pesant sur les sols et les services écosystémiques qu'ils rendent, tout au long du cycle des connaissances, en proposant une revue systématique de la littérature scientifique (Figure 4).

Le **chapitre 3** contribue à répondre aux questions soulevées par le défi de surveillance des sols (Figure 4). Il analyse les principales similarités et différences entre les systèmes de surveillance des sols de plusieurs pays européens, en tenant compte des méthodes d'échantillonnage et des paramètres/indicateurs qu'ils mesurent, tout en explorant les opportunités d'harmonisation à l'échelle européenne. Une attention particulière est portée au cas du système français, à travers une étude détaillée du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS), fournissant un exemple concret de la mise en œuvre d'un système national. Ce chapitre propose également une comparaison entre les indicateurs scientifiques utilisés pour évaluer les menaces pesant sur les sols et la perception qu'en ont les acteurs locaux.

Le **chapitre 4** aborde la phase du cycle des connaissances sur le transfert de connaissances, et se concentre plus spécifiquement sur ses limites, en explorant l'accès des acteurs à la connaissance sur les sols en France et en identifiant des possibilités d'amélioration à partir du point de vue de six catégories d'acteurs (Figure 4).

Le **chapitre 5**, quant à lui, se penche sur la phase d'application des connaissances à travers les sciences participatives, en examinant des projets, passés et en cours, portant sur les sols agricoles en Europe (Figure 4). Ce chapitre met en évidence les principaux facteurs de réussite de ces projets et propose des recommandations pour soutenir et promouvoir davantage les sciences participatives dans le domaine de la santé des sols.

L'ensemble de ce travail est basé sur deux approches complémentaires présentées dans le **chapitre 1** : d'une part des enquêtes multi-acteurs permettant de recueillir des données auprès d'acteurs clés, et d'autre part une revue systématique des connaissances scientifiques. Cette double approche permet de croiser les perspectives des acteurs avec les connaissances scientifiques existantes pour une compréhension plus complète des enjeux liés à la santé des sols.

Les chapitres 2, 3, 4 et 5 sont issus de 6 articles publiés (4), soumis (1), ou en préparation (1), expliquant l'alternance entre français et anglais selon les parties du manuscrit.

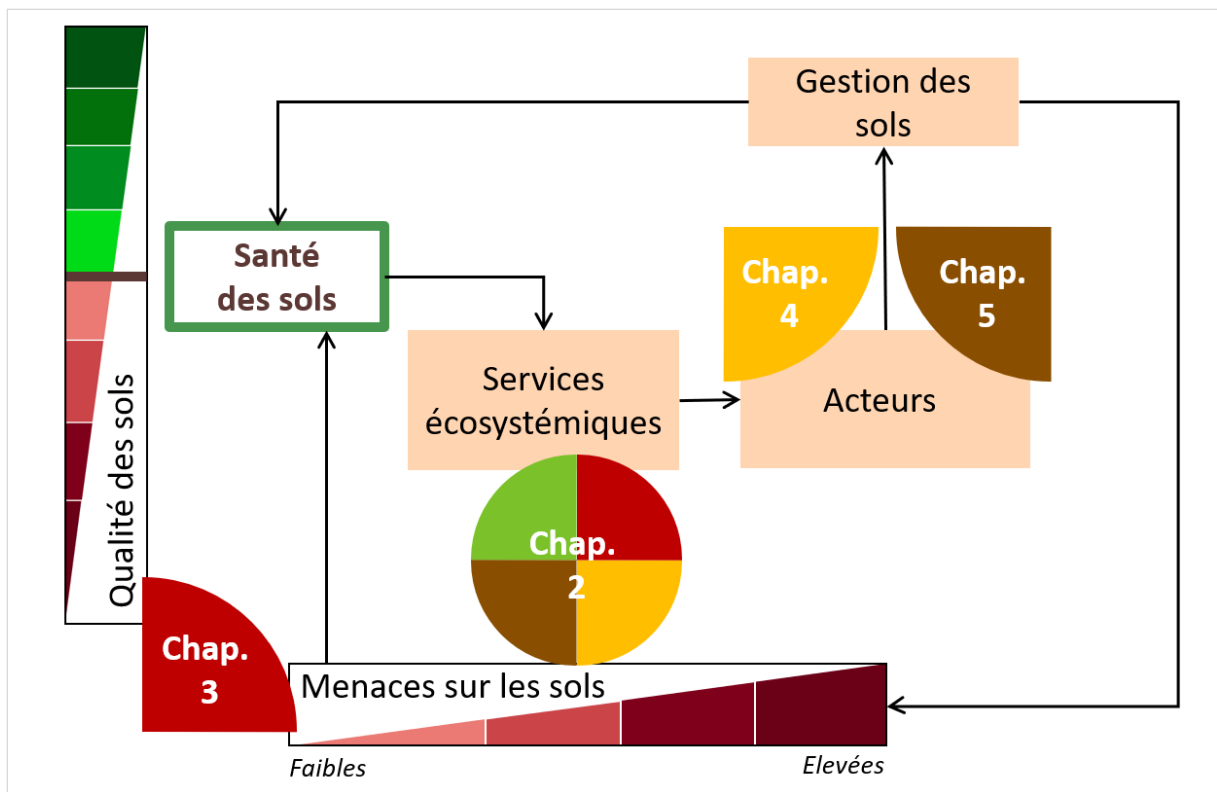


Figure 4 : Cadre conceptuel des interactions pour la santé des sols, adapté et structuré en fonction des thèmes abordés dans chaque chapitre.

CHAPITRE 1 :

Approches méthodologiques

Sommaire

1.1. Les enquêtes auprès des acteurs par questionnaires en ligne.....	24
1.1.1. Conception et stratégies de diffusion des questionnaires	24
1.1.2. Représentativités des réponses obtenues	26
1.2. La revue systématique, synthèse des connaissances scientifiques.....	26
1.2.1. L'identification et la sélection de corpus de littérature.....	27
1.2.2. L'analyse textuelle, une approche permettant une analyse du contenu de corpus volumineux.....	27

CHAPITRE 1 : Approches méthodologiques

Ces travaux de recherche sont basés sur deux approches complémentaires. La première approche repose sur des enquêtes multi-acteurs, visant à recueillir des données auprès d'acteurs clés, et est utilisée dans les chapitres 3, 4 et 5. La seconde approche consiste en une revue systématique des connaissances scientifiques existantes sur les menaces et les services écosystémiques des sols, ainsi que sur un système national de surveillance des sols, appliquée dans les chapitres 2 et 3.

1.1. Les enquêtes auprès des acteurs par questionnaires en ligne

Selon Jones et al. (2013), les enquêtes présentent l'avantage de porter sur une population importante et de permettre la collecte de grandes quantités d'informations et ainsi donc d'avoir une grande puissance statistique et de disposer de modèles validés. Ainsi, depuis les années 1940, les enquêtes sont utilisées par les chercheurs pour collecter des données, en employant soit des méthodes quantitatives, telles que les questions à choix multiples et prédéfinies, soit des méthodes qualitatives, telles que les questions ouvertes, voire une combinaison des deux (Ponto, 2015).

Dans cette thèse, quatre des six articles reposent sur des enquêtes pour lesquelles un questionnaire ciblé a été élaboré afin de collecter des données spécifiques auprès de différents acteurs. Deux articles utilisent des méthodes quantitatives afin d'avoir un aperçu de la perception des acteurs concernés par les sols sur des sujets tels que la perception des menaces ou de l'accès à la connaissance. Le questionnaire commun aux deux articles a été distribué à divers groupes, dont les agriculteurs, les autorités publiques (municipalités, départements, régions, ministères), les conseillers agricoles, ainsi que des membres issus de la recherche, de l'enseignement supérieur, des ONG, et de l'enseignement agricole (lycées agricoles). Les deux autres articles adoptent une approche mixte, combinant méthodes quantitatives et qualitatives, avec des questionnaires conçus pour recueillir des informations auprès d'experts sur des thèmes spécifiques, tels que les systèmes de surveillance des sols et les projets de sciences participatives, dans le but de réaliser une revue approfondie.

1.1.1. Conception et stratégies de diffusion des questionnaires

Les différents questionnaires (**Annexes B, C, et D**) ont été conçus en s'appuyant sur des initiatives précédentes menées en France et en Europe dans le cadre du programme de recherche européen EJP SOIL (**Annexe E**) sur les sols (Bispo et al., 2021 ; Keesstra et al., 2021 ; Ranjard et al., 2022 ; Gascuel et al., 2023) qui ont été adaptés pour tenir compte des objectifs spécifiques de chaque étude. Avant leur diffusion, les questionnaires ont été prétestés auprès d'un échantillon d'acteurs représentatifs, permettant ainsi de recueillir des retours critiques pour ajuster la formulation des questions, améliorer leur clarté et garantir leur pertinence. Le choix entre questions ouvertes et fermées a également été dicté par les objectifs de chaque questionnaire et le profil des répondants. Les questions fermées permettent une analyse comparative plus simple et standardisée, notamment pour évaluer des perceptions générales ou des pratiques courantes. En revanche, les questions ouvertes étaient particulièrement utiles dans

les sections où nous cherchions à capter des opinions nuancées ou des retours plus spécifiques, comme dans le questionnaire sur les systèmes de surveillance des sols (SMS), où les experts avaient l'occasion de détailler des aspects techniques ou d'évoquer des points non couverts par les questions fermées.

Cependant, l'utilisation de questions prédéfinies comporte certaines limites. Ce type de questionnaire peut restreindre la capacité des répondants à exprimer des idées non anticipées ou des points de vue complexes (Connor Desai & Reimers, 2019). De plus, même avec des questions ouvertes, les participants peuvent être influencés par les formulations, limitant ainsi l'exploration de réponses plus originales. Ces limites doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats, car elles peuvent affecter la profondeur des informations recueillies.

Concernant le mode de diffusion, nous avons opté pour des enquêtes en ligne, privilégiant cette option pour sa praticité et son efficacité. Ce choix permettait d'atteindre un large éventail d'acteurs dans différentes régions et pays, tout en réduisant les coûts et le temps associés à des méthodes plus traditionnelles comme les entretiens individuels. De plus, les questionnaires en ligne facilitent la collecte et l'analyse de données à grande échelle. Les listes de diffusion ont été choisies en fonction des types d'acteurs ciblés et des objectifs de chaque enquête : (i) le questionnaire sur la perception des acteurs visait une large gamme d'acteurs liés aux sols (agriculteurs, chercheurs, conseillers agricoles, ONG, etc.). La diffusion via les réseaux sociaux, les contacts directs et les conseillers agricoles a permis de maximiser la participation des agriculteurs et des acteurs locaux, souvent difficiles à toucher par des canaux institutionnels traditionnels ; (ii) le questionnaire sur les systèmes de surveillance des sols ciblait des experts et des points de contact nationaux spécialisés dans la surveillance des sols. Les invitations ont donc été envoyées par courrier électronique aux personnes identifiées comme étant les plus pertinentes, avec l'aide des contacts fournis par le programme EJP SOIL et le JRC. Ce choix était dicté par le besoin d'obtenir des réponses de spécialistes ayant une connaissance technique des systèmes de surveillance ; (iii) le questionnaire sur les sciences participatives a été diffusé par courrier électronique à des personnes ayant coordonné ou participé à des projets de sciences participatives liés aux sols, tant au sein qu'en dehors du programme EJP SOIL, via les points de contact nationaux de l'EJP SOIL et la liste de diffusion de l'European Citizen Science Association (ECSA). Ce mode de diffusion ciblé a facilité l'identification des initiatives existantes et des expériences pertinentes dans ce domaine.

Cependant, ce mode de diffusion présente plusieurs limites. Les enquêtes en ligne peuvent entraîner un biais de sélection, excluant certains groupes, notamment les acteurs plus âgés ou ceux ayant un accès limité aux technologies numériques. De plus, elles sont souvent associées à un taux de réponse plus faible, ce qui peut compromettre la représentativité des résultats (Andrade, 2020). L'impossibilité de clarifier les questions en temps réel peut également entraîner des réponses imprécises. Enfin, le format en ligne peut démotiver certains répondants, affectant ainsi la qualité et la profondeur des données recueillies.

1.1.2. Représentativité des réponses obtenues

Dans le cadre de cette thèse, la collecte de données exhaustives auprès de l'ensemble de la population cible était impraticable en raison de l'envergure nationale ou internationale et de la dispersion géographique des acteurs concernés. Par conséquent, un échantillonnage représentatif a été privilégié afin de garantir la validité externe des résultats et de s'assurer de leur généralité pour l'ensemble des acteurs étudiés (Alavi et al., 2024).

Pour les questionnaires visant à comparer les réponses entre différents groupes d'acteurs (par exemple, agriculteurs, autorités publiques, chercheurs), un échantillonnage stratifié a été employé. Cette méthode divise la population en strates homogènes selon des critères pertinents (par exemple, profession, département), puis sélectionne un échantillon aléatoire dans chaque strate. Elle garantit une représentation proportionnelle des différents sous-groupes d'acteurs et permet une comparaison rigoureuse des réponses entre eux (Lohr, 2021). En ce qui concerne, les questionnaires impliquant des « experts internationaux », un échantillonnage par jugement a été adopté. Cette méthode sélectionne intentionnellement des experts reconnus pour leur compétence spécifique, assurant ainsi la qualité des données et leur pertinence pour les questions complexes abordées. Cette approche permet également de prendre en compte une diversité géographique et disciplinaire.

Pour tester la représentativité de notre échantillon, nous avons utilisé une approche par saturation. Cette méthode considère l'échantillon comme représentatif dès lors que l'ajout de nouvelles observations n'apporte plus d'informations qualitativement nouvelles ni de changements significatifs dans les tendances observées (Savoie-Zajc, 2007). De plus, Ramsey et Hewitt (2005) considèrent qu'au-delà de 350 réponses, une catégorie d'acteurs est raisonnablement bien représentée dans le cadre d'enquêtes quantitatives. Ce seuil permet de garantir un niveau de précision suffisant pour les analyses statistiques, même dans les populations de grande taille.

Cependant, certaines limites doivent être prises en compte pour interpréter prudemment les résultats obtenus avec ces méthodes d'échantillonnage. Tout d'abord, le biais de non-réponse reste un enjeu majeur. Même avec un échantillonnage représentatif, certains participants peuvent choisir de ne pas répondre, et leurs caractéristiques ou opinions peuvent différer de celles des répondants, ce qui peut limiter la généralisation des résultats à l'ensemble de la population cible (Groves et al., 1992). De plus, la stratification des sous-groupes peut parfois manquer de précision, avec une sur- ou sous-représentation de certaines catégories d'acteurs, ce qui pourrait biaiser les résultats et affecter leur validité externe (Lohr, 2021).

1.2. La revue systématique, synthèse des connaissances scientifiques

Cette thèse s'appuie sur des revues systématiques de la littérature dans deux articles. L'un a pour objectif de fournir une vue d'ensemble détaillée des connaissances scientifiques existantes sur les menaces et les services écosystémiques des sols. L'autre article examine les publications scientifiques issues du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS). La revue systématique a été réalisée en deux étapes successives. La première étape a consisté en l'identification et la sélection des publications scientifiques pertinentes, constituant ainsi le corpus de recherche. Lorsque le corpus était limité (moins de 50 publications), une lecture in extenso des publications a été effectuée afin d'approfondir l'analyse. Pour les corpus plus

volumineux, une analyse textuelle a été réalisée afin d'identifier des sous-groupes thématiques et de faire émerger les principales tendances et orientations de la recherche dans le domaine.

1.2.1. L'identification et la sélection de corpus de littérature

Pour constituer les deux corpus d'articles, des recherches par mots-clés ont été effectuées dans plusieurs bases de données bibliographiques en ligne telles que Web of Science, Scopus, Google Scholar, et l'archive ouverte HAL. Afin de garantir la pertinence et l'exhaustivité des résultats, des exercices de cadrage ont été réalisés. Ces exercices ont consisté à définir et affiner les ensembles de mots-clés en fonction de la thématique de la recherche. Cette phase d'ajustement itératif a permis de tester différentes combinaisons de termes afin de maximiser la couverture des résultats obtenus. Chaque base de données ayant ses propres spécificités, les chaînes de recherche ont été adaptées à l'outil utilisé, tout en veillant à ce que les mots-clés choisis capturent l'ensemble des publications pertinentes. Ces mots-clés ont ensuite été recherchés dans tous les champs disponibles des articles, notamment les titres, résumés et mots-clés, afin d'assurer une couverture la plus complète possible des résultats. Une fois les publications identifiées, une vérification manuelle a été effectuée pour chaque article avant son ajout au corpus. Cette étape a consisté à examiner le contenu du résumé des articles afin de s'assurer que l'étude correspondait bien aux critères thématiques de la recherche. Ce processus a permis d'exclure les publications qui, malgré la correspondance des mots-clés, ne répondaient pas aux objectifs de l'étude. De plus, les doublons ont été systématiquement supprimés afin de garantir la qualité et la précision des corpus.

Malgré l'efficacité de la méthodologie adoptée, plusieurs limites doivent être prises en compte. Le choix des mots-clés, bien qu'optimisé, peut ne pas couvrir toutes les publications pertinentes, notamment si les termes utilisés dans les articles diffèrent de ceux sélectionnés. De plus, la prédominance des publications anglophones peut entraîner l'exclusion d'études importantes rédigées dans d'autres langues, ce qui limite la diversité géographique des perspectives prises en compte. Enfin, certaines connaissances pourraient ne pas avoir été incluses, soit parce qu'elles ont été publiées avant la mise en place des bases de données consultées, soit parce qu'elles sont parues après la période de recherche, ce qui peut limiter la portée des résultats synthétisés.

1.2.2. L'analyse textuelle, une approche permettant une analyse du contenu de corpus volumineux

Les corpus obtenus ont ensuite été analysés par analyse textuelle pour obtenir une compréhension globale de leur contenu. L'analyse textuelle permet d'explorer rapidement de grandes quantités de littérature et de corrélérer de grands volumes de données (Aviso et al., 2020 ; Ubando et al., 2021). Elle permet de se faire une idée des thèmes abordés et des relations qui existent entre ces thèmes (Réchauchère et al., 2018). L'analyse s'est concentrée sur quatre points clés : (i) évaluer les activités de publication au fil du temps ; (ii) identifier les principaux acteurs qui publient ; (iii) obtenir une vue d'ensemble des connaissances existantes en matière de recherche et innovation ; et (iv) identifier les thèmes spécifiques. Les champs de référence des articles utilisés pour l'analyse du corpus sont pour chaque article le résumé, les auteurs, l'année de publication et la langue de la publication.

L'analyse textuelle se compose de deux étapes principales (El Akkari et al., 2018). La première étape a pour objectif d'identifier les mots ou groupes de mots (termes) les plus utilisés au sein des articles (titre et résumé) et de calculer leur fréquence dans le corpus global. Les mots sans signification spécifique (conjonctions de coordination, mots présents dans tous les articles scientifiques) sont éliminés. Les synonymes (mots ou termes) sont combinés, puis la liste des principaux termes trouvés (qui ont été combinés ou non) dans le corpus est élaborée. La deuxième étape de l'analyse textuelle consiste à évaluer la fréquence de co-occurrence des termes, c'est-à-dire la fréquence à laquelle deux termes apparaissent ensemble dans un même article. À partir de ces données, des « cartes de réseau » ou « network mappings » sont générées, offrant une visualisation synthétique des résultats. Ces cartes représentent visuellement les thématiques abordées dans le corpus en montrant les termes les plus fréquents ainsi que ceux qui co-apparaissent fréquemment. Les mots-clés sont ainsi regroupés en clusters, c'est-à-dire en ensembles de termes apparentés. L'analyse des termes au sein de chaque cluster, ainsi que des relations entre ces termes, permet d'identifier les thèmes spécifiques associés à un groupe d'articles. En outre, l'examen des liens entre les différents clusters révèle comment les divers thèmes du corpus sont interconnectés, offrant ainsi une compréhension plus globale des relations thématiques au sein de l'ensemble des publications.

Cependant, l'analyse textuelle présente certaines limites. D'abord, elle repose principalement sur des approches quantitatives et néglige donc le contexte et la nuance des publications. De plus, l'analyse des co-occurrences de termes peut parfois surévaluer l'importance de certaines associations, sans toujours refléter les liens conceptuels réels. Enfin, l'élimination des termes courants et la combinaison de synonymes peuvent entraîner une perte d'information subtile ou omettre des termes pertinents qui n'apparaissent pas fréquemment mais sont essentiels à la compréhension d'un sujet spécifique.

Les analyses textuelles ont été réalisées à l'aide du programme d'analyse de texte CorText Manager. Cette plateforme numérique d'analyse textuelle a été développée par l'IFRIS (Institut Francilien Recherche, Innovation et Société). L'IFRIS est un consortium d'Unités de Recherche qui travaillent sur les questions liées aux interactions entre sciences, techniques et sociétés ainsi que politiques de recherche et d'innovation.

CHAPITRE 2 :

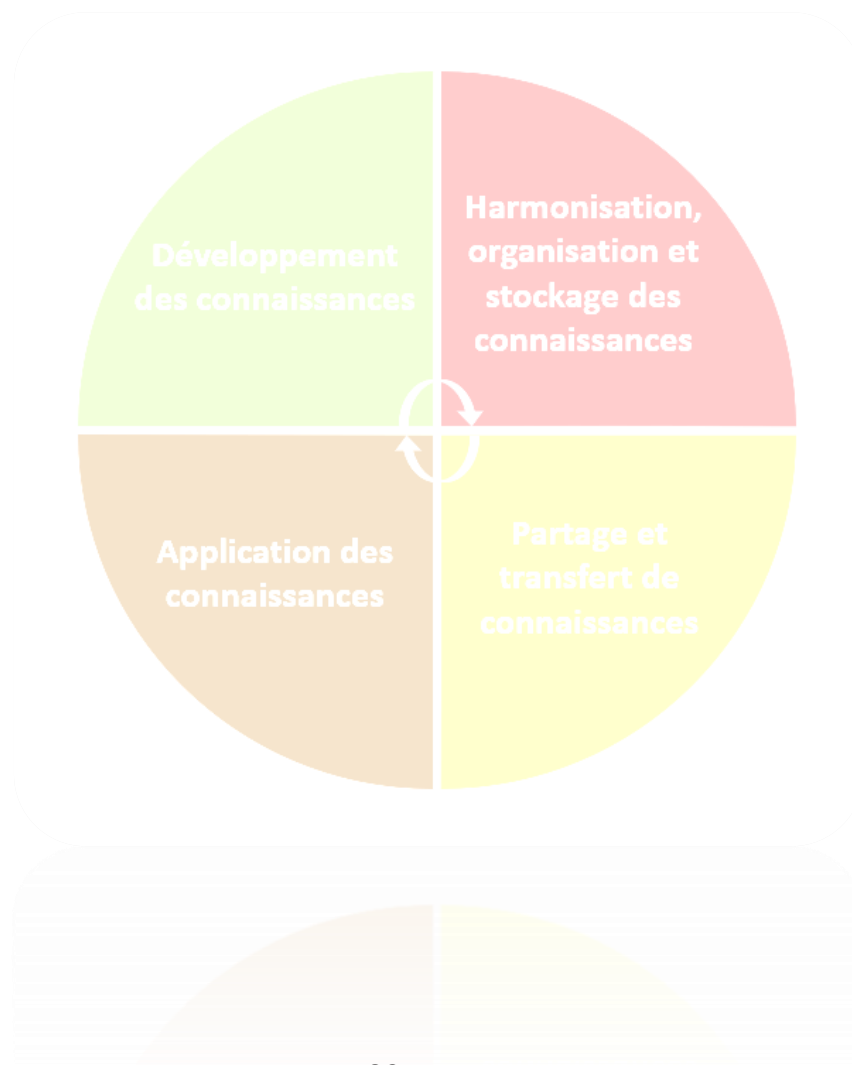
Etat des lieux des connaissances

sur les menaces et les services écosystémiques

structuré selon le cycle des connaissances

Sommaire

2.1.	Sustainable soil and land management: a systems-oriented overview of scientific literature	30
2.2.	Conclusion du chapitre 2	47



2.1. Sustainable soil and land management: a systems-oriented overview of scientific literature

Mason, E., Bispo, A., Matt, M., Helming, K., Rodriguez, E., Lansac, R., Carrasco, V., Rafiul, M., Verdonk, L., Prokop, G., Wall, D., Francis, N., Laszlo, P., & Löbmann, M. (2023). Sustainable soil and land management: a systems-oriented overview of scientific literature. Frontiers in Soil Science, 3. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1268037>

Article publié dans Frontiers in Soil Science

Soumis le 27 juillet 2023, accepté le 29 novembre 2023, disponible en ligne depuis le 18 décembre 2023

L'article a été rédigé dans le cadre du projet Soil Mission Support (SMS), et plus précisément dans le WP2 (Inventaire R&I et identification des lacunes de connaissances) (**Annexe E**, Figure A2).

ABSTRACT

Healthy soil is vital for our wellbeing and wealth. However, increasing demand for food and biomass may lead to unsustainable soil and land management practices that threaten soils. Other degradation processes such as soil sealing also endanger soil resources. Identifying and accessing the best available knowledge is crucial to address related sustainability issues and promote the needed transition towards sustainable soil and land management practices. Such knowledge has to cover all knowledge domains, system knowledge, target knowledge, and transformation knowledge. However, a comprehensive overview of existing research addressing societal needs related to soil is still missing, which hinders the identification of knowledge gaps. This study provides a detailed analysis of scientific literature to identify ongoing research activities and trends. A quantitative and qualitative analysis of scientific literature related to sustainable soil and land management was conducted. A systems-oriented analytical framework was used that combines soil and land related societal challenges with related knowledge domains. Our analysis revealed a significant increase in scientific publications and related interest in soil and land use-related research, above the average increase of publications within all scientific fields. Different forms of reduction and remediation of soil degradation processes (e.g. erosion, contamination) have been studied most extensively. Other topic areas like land take mitigation, soil biodiversity increase, increase of ecosystem services provision and climate change mitigation and adaptation seem to be rather recent concerns, less investigated. We could highlight the importance of context-specific research, as different regions require different practices. For instance, boreal, tropical, karst and peatland regions were less studied. Furthermore, we found that diversifying soil management practices such as agroforestry or including livestock into arable systems are valuable options for increasing biomass, mitigating/adapting to climate change, and improving soil related ecosystem services. A recent trend towards the latter research topic indicates the transition from a soil conservation-oriented perspective to a soil service-oriented perspective, which may be better suited to integrate the social and economic dimensions of soil health improvement alongside the ecological dimension.

Keywords

CorTexT; Knowledge gaps; Literature Analysis; Societal challenge; Soil mission; Stock assessment

INTRODUCTION

Healthy soil is the foundation for healthy life and it is the primary source of food (FAO & ITPS, 2015). At the same time, soil contributes to climate change while providing habitats for biodiversity and clean water. It preserves our cultural heritage and is a key part of our landscapes (Schirpke et al., 2017; Helming et al., 2018b). However, soils are threatened globally because of (i) a higher demand for food, feed and fiber which leads to an increasing pressure on soil and land resources (Popp et al., 2014), and (ii) an increase of soil and land degradation caused amongst others by unsustainable management practices in agriculture and forestry, contamination, and soil sealing through urbanization and infrastructures (Veerman et al., 2020). Due to compaction, erosion, pollution, nutrient depletion, acidification and salinization, 33% of the world's soils are moderately to highly degraded (FAO & ITPS, 2015). In Europe, the EUSO soil health dashboard (2023) developed and maintained by the European Joint Research Centre (JRC) indicates that more than 60% of European soils are considered as degraded.

The topic is gaining importance in the European Union (EU) and globally. On the one hand, EU invested considerably to support soil research (Arias-Navarro et al., 2023) and on the other hand, over the last years, a number of policies on soil health have been set up by the European Commission (EC). In 2023, the EC published the proposal for a 'Directive of Soil Monitoring and Resilience' referred to as the 'Soil Monitoring Law' (European Commission, 2023). It is supposed to support the European Green Deal and contribute to the EU Biodiversity Strategy and Farm to Fork Strategy. The Horizon Europe Mission 'A Soil Deal for Europe' is planned to underpin, inter alia, the success of the Soil Monitoring Law through the provision of science-based evidence (Veerman et al., 2020). At the same time, it is a key part of the European Union's commitment to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs). As such, it integrates all of the so far separately addressed soil and land use types as well as the full cycle of knowledge co-production, testing, dissemination, adoption and monitoring into one comprehensive framework.

Science has a role to play in identifying and promoting sustainable soil management practices. Here, scientific evidence should serve a wide range of knowledge domains, including systems knowledge such as basic knowledge generation, systems understanding, target knowledge such as modelling and assessment of management practices in different conditions and contexts, and transformation knowledge such as co-designing solutions and evidence-based policy support (Löbmann et al., 2022). A large number of articles have been published in scientific journals presenting research achievements on sustainable soil and land management covering a range of knowledge domains. However, a soil systems-oriented overview of existing research and innovation (R&I) knowledge with a focus on sustainable soil and land management across the different land use types and knowledge domains has not yet been conducted to date. In this study, we performed a combined quantitative and qualitative analysis of scientific literature on sustainable soil and land management in order to provide a comprehensive and detailed overview of existing R&I knowledge within the broader topic area. The objective was to inventory existing articles related to i) the main societal challenges for which soil and land management is relevant, combined with ii) ten knowledge domains as described in the systems-oriented analytical framework published by Löbmann et al. (2022).

Exploring the R&I existing knowledge will contribute subsequently to identify R&I gaps by comparing the existing knowledge domains to the actor's needs.

MATERIAL AND METHODS

A study based on a systems-oriented analytical framework

The knowledge stock assessment, which followed a systemic approach that covered all soil and land use types, including agriculture, forestry, protected areas, industry, urban areas and infrastructure, was based on an adapted version of the systems-oriented analytical framework for sustainable soil and land management by Löbmann et al. (2022). Based on the SDGs, they developed a systems-oriented analytical framework that combines six soil and land use related societal challenges with eight inter- and transdisciplinary knowledge domains that need to be addressed in order to ensure practical transition towards sustainable soil and land management. The framework provides a sound methodology for gaining a holistic overview of soil and land related problem situations in order to propose mission-oriented research questions as embedded within a dynamic systems context targeted at co-creational research performance that includes actual implication of R&I within practice, economy, society and policy (Löbmann et al., 2022).

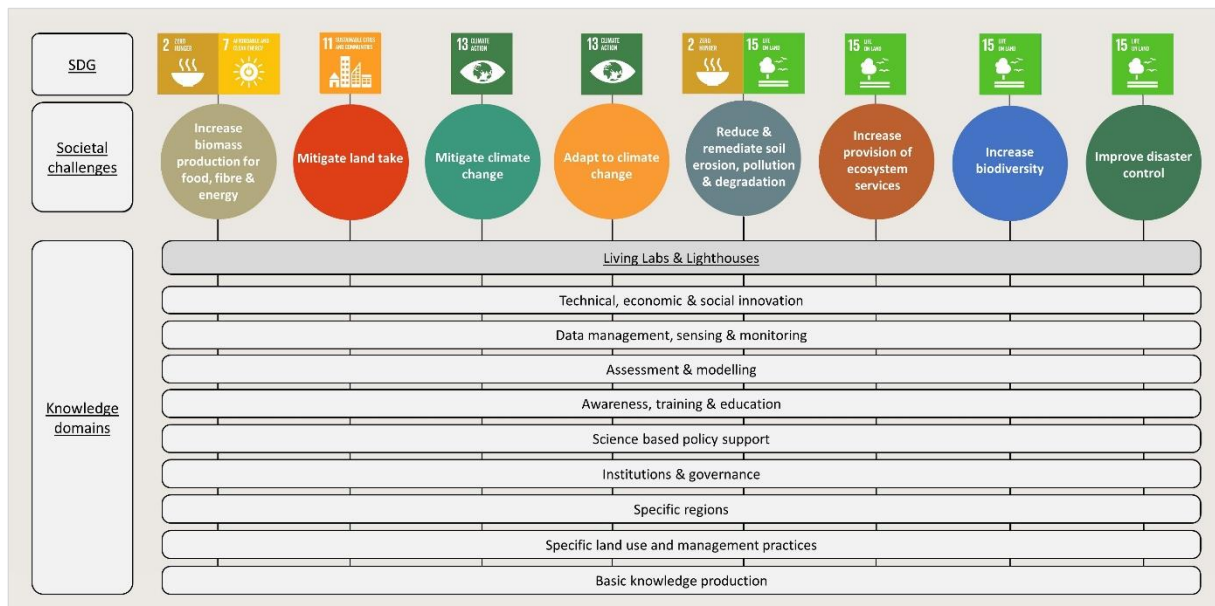


Figure 5: The systems-oriented analytical framework for the literature search and analysis adapted from Löbmann et al. (2022). It combines soil and land related societal challenges with relevant knowledge domains. ‘Living Labs & Lighthouses’ are emphasized, since they are a key strategic element for the implementation of the European Soil Mission (European Commission, 2021c).

For the purposes of this study, we adapted the systems-oriented analytical framework by separating some of the societal challenges and knowledge domains into individual assessment areas, in order to gain a more detailed analysis (Figure 5). We included eight soil related societal challenges and ten knowledge domains, while the overall content was not changed. Specifically, we split the societal challenges ‘mitigate and adapt to climate change’ to ‘mitigate climate

change’ and ‘adapt to climate change’, as well as ‘increase provision of ecosystem services and biodiversity’ to ‘increase provision of ecosystem services’ and ‘increase biodiversity’. We split the knowledge domain ‘specific regions and sectors’ to ‘specific regions’ and ‘specific land use and management practices’, and we decided to add a tenth knowledge domain ‘basic knowledge production’. Basic knowledge is seen here as research that aims at basic understanding of processes and inter-relationships, without any direct links to practical application.

Search and selection of relevant articles

Through a keyword based bibliographic search in Scopus (Elsevier), we identified all peer-reviewed scientific articles related to soil and land management (Mason et al., 2023b). The search was performed throughout April 2021, considering all articles published and available in Scopus until the end of 2020, just before the Horizon Europe Mission ‘A Soil Deal for Europe’ started. The search covered all soil and land use sectors and all types of soil and land management, including agriculture, forestry, protected areas, urban and industrial soil use. The article identification was performed individually for each cell of the systems-oriented analytical framework (‘societal challenge’ X ‘knowledge domain’) (Figure 5). Sets of keywords in English were identified for each of the 80 cells (**Annex A**). A scoping exercise was conducted on the Scopus database to build-up the search strings. Given the existence of numerous synonyms for concepts related to the different societal challenges and knowledge domains, the search term was constructed by crossing, one by one, the different synonyms existing, including variations in their spelling. Construction of the list of synonyms was based on different studies (Pellerin et al., 2019; Zhang et al., 2019; Oliveira, 2020). So as not to overlook the characteristic of action/change of the societal challenges (i.e. ‘increase’, ‘improve’, ‘adapt’, ‘reduce’ and ‘mitigate’), action verbs were integrated in the search strings. The keywords ‘soil’ and ‘land’ were also included in the search strings as we were looking for soil and land related scientific articles. For cells with ≤ 50 identified articles, a screening for relevance was performed, based on the title and abstract. Articles addressing topics that did not fit into the respective cell were either removed or relocated to a more appropriate cell. Due to their large volume, cells > 50 articles were not screened. Remaining articles were extracted, including article related information on title, abstract, keywords, year of publication, authors, authors’ countries and institutions, related societal challenges and knowledge domains.

Content analysis of the articles

A content analysis of all articles was conducted for each cell of the systems-oriented analytical framework. The analysis focused on four key points: (i) getting a general overview of existing R&I knowledge; (ii) assessing publication activities over time; (iii) identifying main actors publishing; and (iv) identifying specific focus topics and promoted practices. Depending on the number of articles in the respective cell, two different analysis pathways were applied. For cells with ≤ 50 articles, the content analysis was based on a desk study of title and abstract and if relevant to the topic, articles were in depth analyzed. Relevant content was then extracted and summarized per cell. For cells with > 50 articles, a textual analysis was performed using the text analysis program CorTexT Manager. CorTexT Manager allows for large-scale literature reviews and correlation of large volumes of data (Aviso et al., 2020; Ubando et al., 2021). Textual analysis allows one to quickly explore large amounts of literature to get an overview of the themes covered and the relationships between these themes (Réchaudère et al., 2018). The textual analysis consisted of two main steps, as proposed by El Akkari et al. (2018). In the

first step, we identified the most used words or groups of words (terms) within title, abstract and keywords and calculated their overall frequency. Words without specific meaning (conjunctions, words present in all scientific articles) were eliminated and synonyms (words or terms) were combined. In the second step, we calculated the frequency of two terms occurring in the same article. Results were summarized in network maps. By analyzing the terms and their relationships within clusters, specific themes could be identified. The relationships between clusters can highlight how different themes in the corpus are related to each other.

Recently, Arias-Navarro et al. (2023) conducted a review of soil related research concentrating only on EU funded projects and searching for the keyword “soil”. Our research covers a far larger domain as we searched for “soil” and “land” as main keywords, developed a dedicated systems-oriented analytical framework and included international references. We also identified main actors publishing.

RESULTS

General overview of existing R&I knowledge

In total, 15,679 relevant articles were identified in Scopus as related to soil and land management after the screening (Mason et al., 2023b). During the screening process, 1,752 articles considered as irrelevant were taken out of the corpus. The 15,679 articles correspond to the total sum of articles per cell. Therefore, some articles might be counted twice as they could be related to several knowledge domains and/or societal challenges. Based on the EU CORDIS database, Arias-Navarro et al. (2023) identified only 1,101 articles for their review.

Out of the 80 cells of the systems-oriented analytical framework (Figure 6), 33 cells have less than 5 articles, 25 cells had between 5 and 49 and 22 cells had ≥ 50 articles. Large differences can be observed regarding the coverage of the eight societal challenges. For some societal challenges, many articles could be identified such as for ‘reduce soil degradation’ (11,285 articles), ‘improve disaster control’ (2,527), ‘mitigate climate change’ (837), ‘increase biomass production’ (613) and ‘adapt to climate change’ (370). Conversely, the societal challenges ‘increase biodiversity’ (130), ‘mitigate land take’ (67) and ‘increase provision of ecosystem services’ (45) were less represented. Similarly, some knowledge domains (Figure 7) yielded many articles such as ‘assessment & modelling’ and ‘basic knowledge production’, while the knowledge domains ‘Living Labs & Lighthouses’, ‘awareness & education’, ‘science-based policy support’ and ‘institutions & governance’ are rather less represented.

All publications were analyzed textually to review the major themes addressed in the 15,679 articles. Overall, the main terms found in the articles were, in descending order: ‘pollution control’, ‘land use’, ‘soil erosion’, ‘climate change’, ‘contaminated soil’, ‘water quality’, ‘air pollution’, and ‘management practices’. Main terms were related to degradation processes and soil threats. The societal challenge ‘reduce soil degradation’ yielded most articles (11,285). Accordingly, the main terms used in the full corpus mainly address this societal challenge.

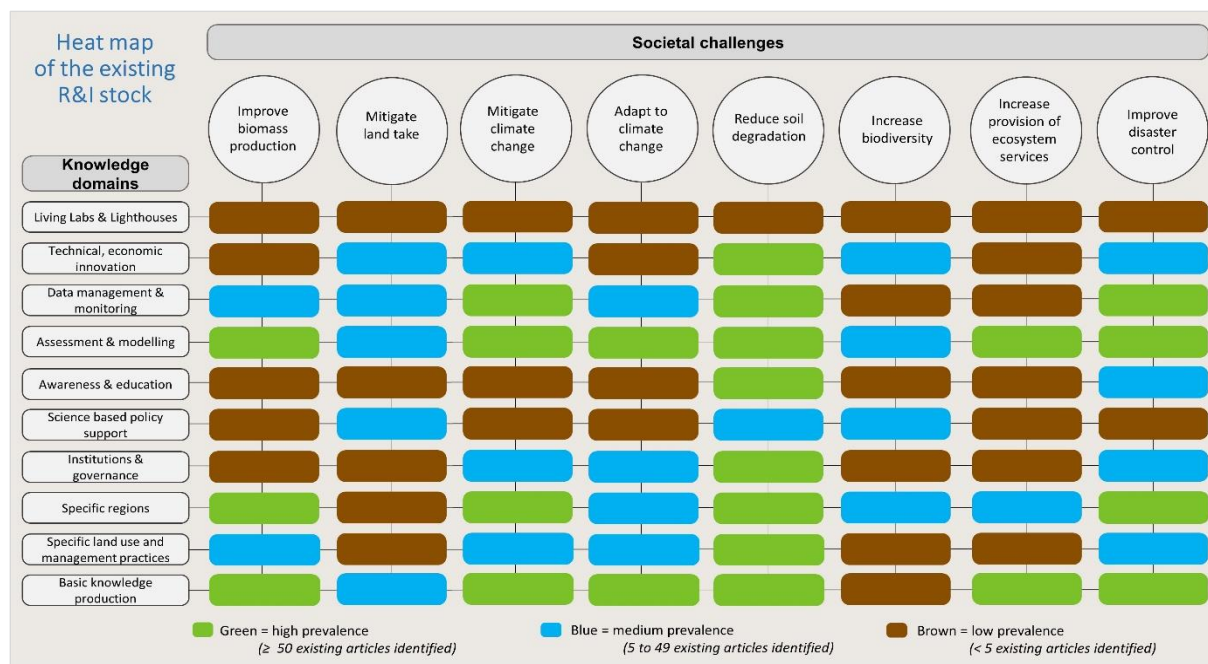


Figure 6: Heat map indicating the abundance of identified scientific literature for each knowledge domain within each societal challenge.

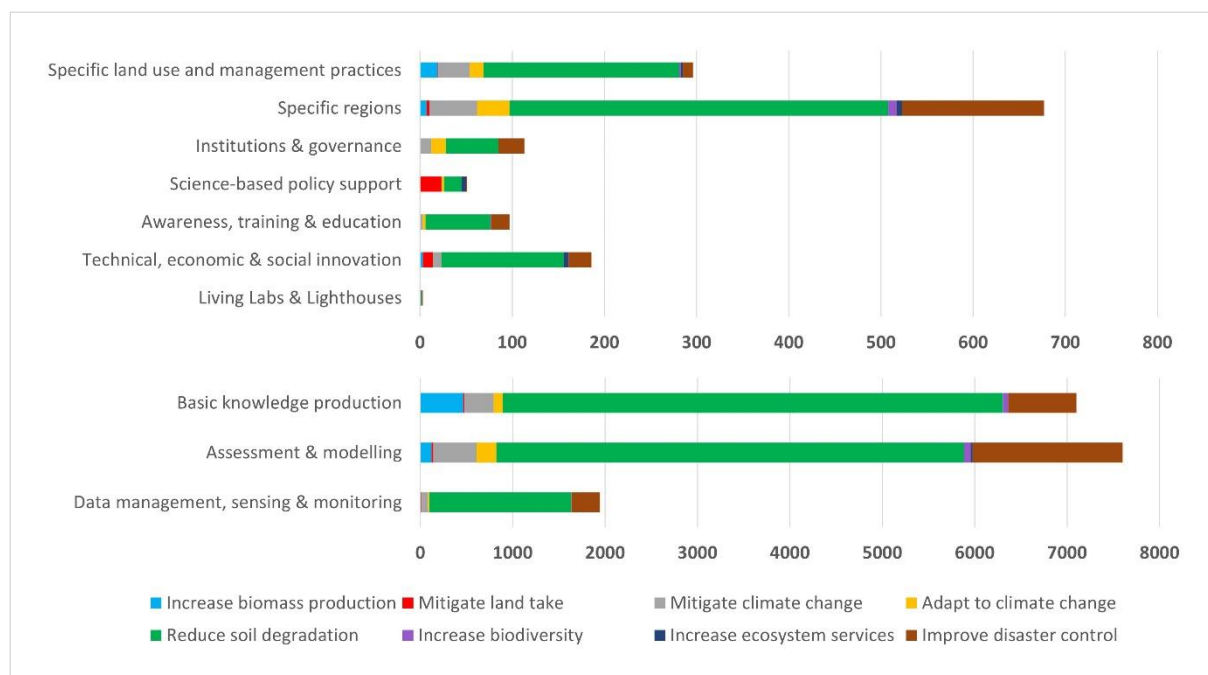


Figure 7: Number of identified scientific articles per knowledge domain and societal challenge.

A network map was built by the text analysis program CorText Manager. The main terms were coalesced together by the tool according to their relationships in five clusters represented by colored circles (Figure 8). Cluster 1 ‘land use & carbon & air pollution’ is closely linked to clusters 4 ‘soil pollution’ and 5 ‘water resources’. It includes terms such as ‘land use change’, ‘air pollution control’, ‘soil organic matter’ and ‘greenhouse gas’. Cluster 2 focused on ‘water pollution’ and is closely related in the analysis to cluster 5 ‘water resources’. Notable terms of the ‘water pollution’ cluster included ‘pollution control’, ‘non-point source pollution’ and ‘water quality’. The ‘soil erosion’ cluster (3) is closely linked to the cluster 5 ‘water resources’. It includes terms such as ‘soil water’, ‘erosion control’, ‘soil erosion’ and ‘soil conservation’.

Cluster 4 ‘soil pollution’ is closely linked to the ‘land use & carbon & air pollution’ cluster. It includes the terms ‘contaminated soil’, ‘soil remediation’, ‘heavy metals’ and ‘soil pollution control’, referring to options to control or remediate soils. Cluster 5 ‘water resources’ is most central in the map and thus linked to most clusters, i.e. ‘land use & carbon & air pollution’, ‘water pollution’ and ‘soil erosion’. It includes the terms ‘water management’, ‘water resources’, ‘river basin’ and ‘flood control’. All five clusters are similar to the clusters found in the results for the most represented societal challenge ‘reduce soil degradation’ as this topic represents more than 70% of the identified papers.

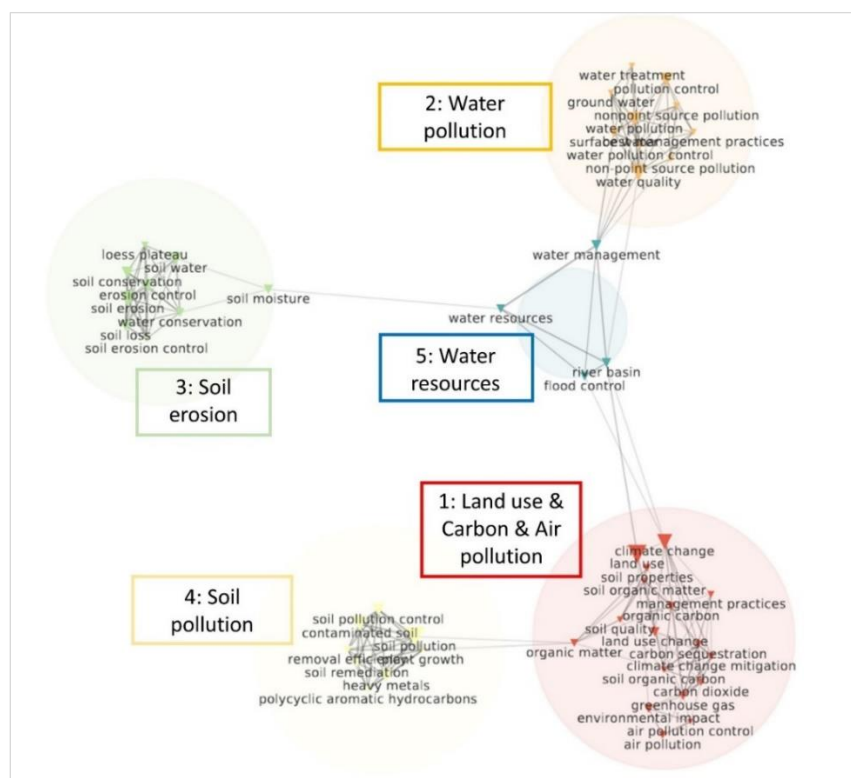


Figure 8: Cluster map of the main terms used in the scientific articles (15,679 articles).

Table 1: Overview of the main terms used per societal challenge and the percentage of articles containing them.

Societal challenges	Main terms used per societal challenge (% of articles per societal challenge containing the main terms)
Increase biomass production	Organic matter (98%); Water use efficiency (51%); Soil water (82%); Crop growth (46%); Bulk density (54%)
Mitigate land take	Land use (100%); Brownfield remediation (30%); Soil remediation (33%); Life cycle (16%); Risk assessment (33%)
Mitigate climate change	Greenhouse gas (100%); Soil organic carbon (70%); Land use (100%); Life cycle (33%); Carbon sequestration (73%)
Adapt to climate change	Land use (100%); Water resources (19%); Adaptation strategies (22%); Food security (17%); Land management (21%)
Reduce soil degradation	Soil pollution (100%); Air pollution (21%); Soil erosion (33%); Contaminated soil (20%); Water pollution (32%)
Increase biodiversity	Life cycle (68%); Environmental impact (23%); Impact assessment (44%); Biodiversity conservation (22%); Soil biota (31%)
Improve disaster control	Flood control (96%); Flood risk (24%); Land use (81%); Risk assessment (23%); Soil moisture (38%)

CorTexT generated a list of the main terms used in the keywords and titles of the corpus per societal challenges (Table 1), except for the societal challenge ‘increase the provision of ecosystem services’ since less than 50 articles were identified. Some main terms can be found in various societal challenges, such as the terms ‘life cycle’ and ‘land use’.

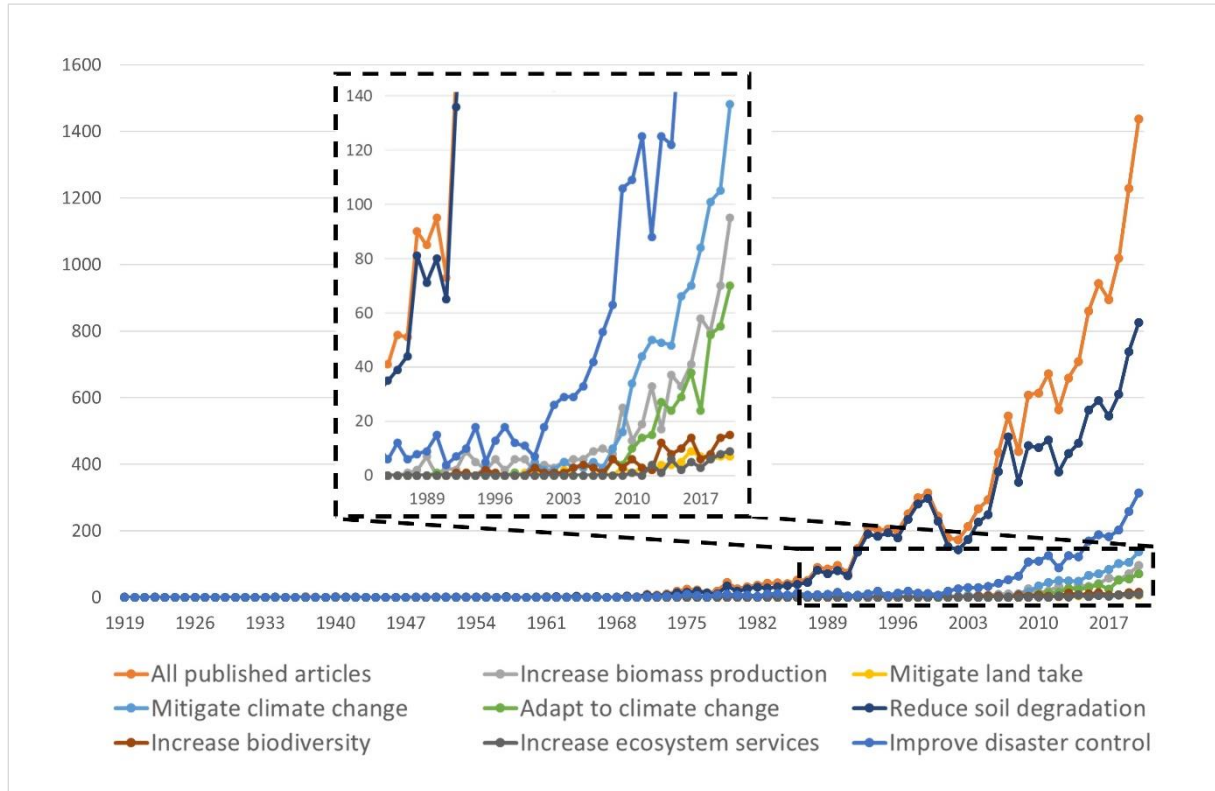


Figure 9: Numbers of published scientific articles per year per societal challenges.

Assessing publication activities over time

In total, 15,679 relevant articles were identified. While early publications could be identified from 1919 (Figure 9), identified articles in Scopus on soil and land management with a focus on the soil are very rare until the 1980s. There has been an increase of publications from 1980 to 2005, followed by a subsequent decline between 1999 and 2001. The number of published articles has surged considerably since 2005, with more than one thousand articles per year. Notably, more than a third of all identified articles (36%, 5,599/15,679) were published in the last five years of this study, i.e. 2016 to 2020.

The number of articles published over time differs for each societal challenge. Related to ‘increase biomass production’, first articles were identified from 1974 and 613 articles were identified in total. There has been a significant increase in general attention in this topic area since 2009. The number of published articles increased rapidly and reached some 95 in 2020. Related to ‘mitigation of land take’, first articles were identified from 1982 and until 2020, 67 articles were found. There has been a slight increase of attention in this area since 2010. However, generally this topic area seems to be little addressed. For ‘climate change mitigation’, 837 articles were identified between 1995 and 2020. There has been a significant increase in general attention in this area since 2010. ‘Climate change adaptation’ yielded 370 articles in the

period from 1990 and 2020. Since 2008, general attention in this area has increased significantly. Related to ‘reduction of soil degradation’, 11,285 articles were identified, published between 1919 and 2020. While very early scientific articles were identified, numbers of publications initially stayed low. Since 1992, a significant increase in the number of scientific publications in this area can be observed. ‘Increase biodiversity’ yielded some 130, published between 1983 and 2020. The number of published articles on increasing soil biodiversity increased from 2013. Some 45 scientific articles were identified related to ‘increase of ecosystem services’, published between 2010 and 2020. Related to improvement of ‘disaster control’, 2,527 articles were identified between 1940 and 2020. Numbers of publications have increased since approximately 2008.

Table 2: Overview of the main studied regions per societal challenge based on the desk analysis.

Societal challenges / Regions	Mediterranean	Boreal	Tropical	Island and coasts	Mountains	Cities and brownfields	Karsts	Peatland
Increase biomass production	X	X		X				
Mitigate land take						X		
Mitigate climate change	X	X						X
Adapt to climate change	X			X	X	X		
Reduce soil degradation	X	X	X	X	X	X	X	
Increase biodiversity	X							
Increase ecosystem services	X			X	X	X		
Improve disaster control				X	X			

Table 3: Overview of the main studied land use and management practices per societal challenge based on the desk analysis.

Societal challenges / Land use, management practices	Inter-cropping	Conservation agriculture	Mixed live-stock & arable systems	Organic soil amendments	Vineyards	Agroforestry	Sealing & contamination remediation
Increase biomass production	X	X		X		X	
Mitigate land take							X
Mitigate climate change		X		X		X	
Adapt to climate change	X	X	X	X		X	
Reduce soil degradation	X				X	X	
Increase biodiversity							
Increase ecosystem services						X	
Improve disaster control	X		X			X	

Main specific regions covered and land use and management practices investigated

We identified the most studied regions in our corpus. Depending on societal challenges, the focus was on different geographical regions (Table 2). For example, soil and land degradation was investigated in many different environments, but peatland could not be found in this context. However, peatland played an important role within climate change mitigation. ‘Mitigate land take’ only covered the cities/brownfields region. Some regions have been studied extensively such as the Mediterranean, islands and coasts, mountains and cities/ brownfields. Conversely, the regions boreal, tropical and karsts were less represented within a soil context.

Depending on the respective societal challenge, different land use and management practices were addressed (Table 3). Agroforestry is often investigated and presented as a valuable option to increase biomass, mitigate/adapt to climate change, improve ecosystem services, control disaster and reduce soil degradation. Few proposed and studied solutions imply a rethinking of agricultural systems by including livestock into arable systems or developing agroforestry. Other studied options are techniques that improve a specific practice (e.g. include soil amendment, develop intercropping, or reduce tillage).

Main actors publishing on the topic

The main countries in total number of articles for all societal challenges are mainly located in the European Union (30%), China (24%) and North America (24%) (Figure 10). Within Europe, the United Kingdom followed by Germany and Spain are the countries who published most articles with 7%, 5% and 4% respectively. Major publishing institutions in Europe are Wageningen University & Research (WUR) in the Netherlands, the Spanish National Research Council (CSIC) in Spain and the French National Center for Scientific Research (CNRS) in France.

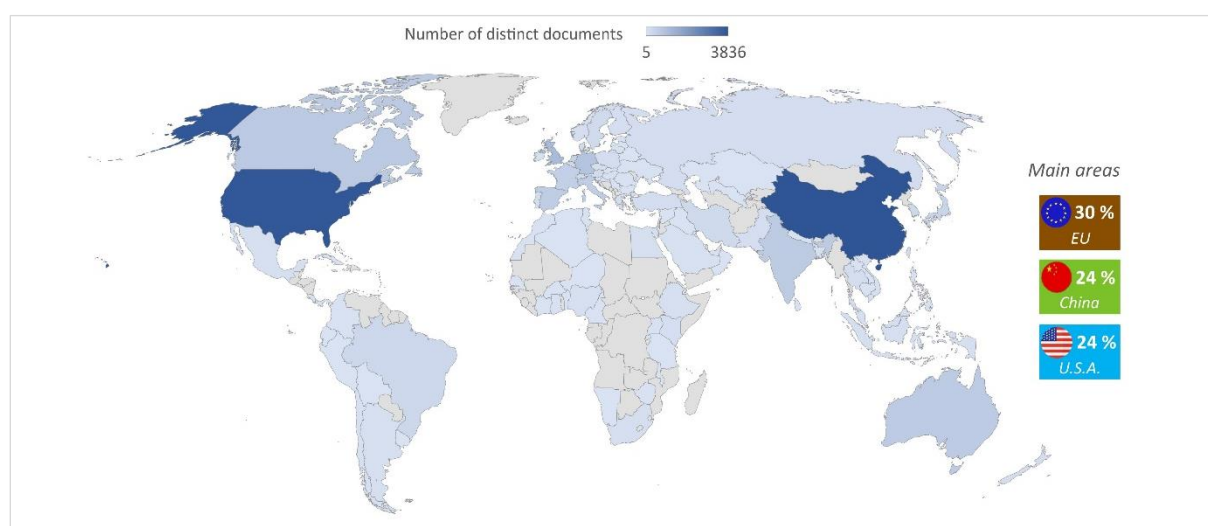


Figure 10: Concentration of published soil related scientific articles per country for all 8 related societal challenges. EU countries are estimated to reach 30%.

DISCUSSION

We could identify an abundant portfolio of scientific literature addressing the eight major soil and land use related societal challenges. We want to emphasize in this context that this literature search was limited to Scopus-indexed scientific journals published in English language, which may exclude large amounts of existing scientific literature. Thus, output from non-English journals and articles is not reflected here, which may be of particular importance for publications in early years, when English was not yet broadly established as a global standard for scientific publishing. Furthermore, although our search strategy is robust for peer-reviewed scientific journal articles, other publishing formats such as conference papers, books, book chapters, and non-digitalized articles, may be underrepresented, or not included in the used database. Non-scientific studies, or non-peer-reviewed scientific articles are also not present in this inventory of articles. Nonetheless, we consider the used database for this review article as representative for the overall trends within the scientific field, since it includes major scientific journals that reflect up-to-date developments through their published articles. However, absolute numbers of identified articles should be regarded carefully and rather seen as trends when comparing different focus topics with each other. In addition, some articles addressed several knowledge domains and societal challenges.

The earliest article we could identify in Scopus related to soil and land use was published in 1919. Generally, we found only a few articles in early years. Thelwall and Sud (2022) investigated the growth in articles throughout time. They found an exponential growth in the number of articles in Scopus from 1900 to 2020. Further, they demonstrated that Scopus searches spanning from 1900 are weak, due to a lack of abstracts in the early years, but stronger in recent years as abstracts are predominantly included. As our study is based on searches of titles, abstracts, and keywords, results obtained are likely to be biased in favor of articles published in more recent years. Accordingly, we found that publication activities (in Scopus) started to increase from the 1970s and further increased considerably from the 2000s. When comparing these figures with the general increase of numbers of scientific publications (all scientific categories combined), we note that between 2005 and 2017, the annual number of scientific peer-reviewed publications increased by 83% to almost 2 million per year (OST, 2021). In our study, the number of scientific peer-reviewed publications on soil and land use increased by 205% during the same period. Hence, we note a very significant general increase in both scientific publication activities as well as related interest in soil and land use associated research, as compared to the overall development within science.

We observed great differences between publication activities associated with each of the eight societal challenges over time. Some of the soil related societal challenges are already widely studied by scientists such as ‘reduce soil degradation’ and ‘improve disaster control’. Together these two challenges account for 88% of the identified literature. The remaining societal challenges ‘increase biomass production’, ‘mitigate land take’, ‘adapt to climate change’, ‘mitigate climate change’, ‘increase biodiversity’ and ‘increase provision of ecosystem services’ represent 12% of the identified articles.

The societal challenge reduce soil degradation alone represents with 72% of the identified articles the major focus area of research. Likewise, this is reflected in the main terms found in the articles, in descending order: ‘pollution control’, ‘land use’, ‘soil erosion’, ‘climate change’, ‘contaminated soil’, ‘water quality’, ‘air pollution’, and ‘management practices’. These terms relate to degradation processes and soil threats. One reason for this could be the broad character of this societal challenge, in addition to the yet vague definitions of related terms like ‘soil degradation’ and ‘degraded soil’ (Löbmann et al., 2022). Ferreira et al., (2022) described three main soil and land degradation categories: physical soil degradation (e.g. soil sealing, compaction, erosion), chemical soil degradation (e.g. loss of soil organic matter, contamination, salinization), and biological soil degradation (e.g. loss of biodiversity, high disease pressure). Thus, this societal challenge covers a broad ground of scientific interests. This finding is in line with Arias-Navarro et al. (2023) who also identified at EU scale the most relevant theme as being contaminated soils. In addition, ‘reduce soil degradation’ is closely linked to all other soil related societal challenges, since it is the basis for soil capacity building (Löbmann et al. 2022). For example, soil sealing for urban, industrial and infrastructure development (see also Land take mitigation) constitutes the most severe form of land degradation and heavily affects all soil ecosystem services (Tobias et al., 2018). Soil erosion on the other hand can have severe ecological impacts. The relationship between erosion and soil biodiversity is reciprocal (Orgiazzi & Panagos, 2018). In addition, climate change is expected to lead to increased soil erosion (Eekhout & de Vente, 2022). Historically, research on soil degradation seems to be often associated with catastrophic events (e.g. the dust bowl event in the USA during the 1930s) (Schubert et al., 2004), or cases of soil degradation that cause public interest (e.g. local soil pollution events) (Gensburg et al., 2009; Baumhardt et al., 2015). Particularly in recent years, soil regenerative topics are becoming more popular, due to a rising realization that degraded soils pose a central problem to many of today’s challenges (FAO & ITPS, 2015; EUSO, 2023). Particularly regenerative agriculture and reforestation are promoted as pathways to improve diverse ecosystem services such as carbon sequestration, water retention (flood and drought prevention), soil fertility or remediation of biodiversity (Lamb, 2018; Gosnell et al., 2019; Schreefel et al., 2020).

Associated with soil degradation, land take mitigation has become a growing concern. First articles identified on this topic were published in 1982. Similarly, Weng (2012) and Peroni et al. (2022) report that in the 1990s, papers on soil sealing were rare, but in the following years the topic gained interest in the scientific community. Several studies pointed out the impact of land take and soil sealing on biodiversity (McKinney, 2002; Pereira et al., 2010; Concepción et al., 2016; Naumann et al., 2018), food security (Tóth, 2012; Gardi et al, 2014) and soil carbon sequestration potential (Tóth et al., 2022). Today, many research efforts go towards developing greener urban designs with less sealed surfaces and better integrated natural and semi-natural structures (Madureira & Monteiro, 2021).

Improve disaster control accounted for 16% of the identified articles. Especially in recent years (since 2008), numbers of publications in this area seem to increase. Main focus areas cover a broad range including floods, wildfires, droughts and hazardous geomorphological events (e.g. landslides). In recent decades, climate change associated topics seem to gain more focus, such as more intense and frequent heat waves. Extreme hot temperatures are usually associated with other disaster events such as droughts (Chiang et al., 2018), or more frequent and more extensive wildfires (Zhang & Biswas, 2017). Similarly, also the frequency of floods and landslides has increased significantly over the last century (Alaoui et al., 2018; Cendrero et al., 2020). Also here, disaster control research puts increasing focus on nature-based rather

than technological solutions. Bagnall et al. (2022) found that for each 1% increase of soil carbon, an extra 150K – 300K L of water per ha can be stored in the soil. Thus, soil regeneration and targeted land management promote resilient ecosystems that prevent both floods through increased water uptake capacities, as well as droughts through more steady water release (Whitfield, 2012; Schneider et al., 2020). Also ecological engineering is gaining more attention for slope failure prevention and remediation (Hubble et al., 2017; Bordoloi & Ng., 2020).

First articles on climate change mitigation related to soils in Scopus were identified rather late (from 1995). This result, as well as the fact that about 94% of articles identified in this field were published between 2010 and 2020, shows that the topic is a rather new concern that rapidly gains attention both in science and society. The role of soils in climate change mitigation was also identified as a main domain of EU research by Arias-Navarro et al. (2023). In 1997, the Kyoto protocol was adopted after which the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) was launched. Through the protocol, the countries with the highest greenhouse gas emissions committed to emission reductions by implementation of mitigation policies and regularly reporting on their emissions. The Kyoto protocol was succeeded by the Paris Climate Agreement (2015) in which nearly all countries committed to a reduction of greenhouse gas emissions in order to limit global warming to 2°C, but preferably 1.5°C. One of the initiatives resulting from the Paris Climate Agreement is the ‘4 per 1000’ initiative in which it is strived for an annual increase of 0.4% in global soil organic carbon stocks (Lal, 2004; Minasny et al, 2017; Rumpel et al., 2018). Oertel et al. (2016) and Chataut et al. (2023) show that under current management, many soils are a climate gas source. However, in order to reach the UN climate goals, they state that soils play a crucial role as a potential climate gas sink, when managed appropriately. Here again, regenerative management is gaining more attention within research, often combined with research on CO₂ offsets and related measurement, monitoring and verification systems (Rumpel et al., 2020).

Similarly, for climate change adaptation, first articles were found from 1990, with a marked increase in publication activity over the past five years (2016-2020). The interest over time in climate change adaptation can be illustrated by the establishment of the National Adaptation Plan (NAPs) process under the Cancun Adaptation Framework (2010) in order to prepare countries for addressing climate risk in the medium term. Recent research confirms the fundamental role of soils in agricultural strategies for climate change adaptation (Hamidov et al., 2018). Promising adaptation solutions include both soil regeneration, introduction of soil and land management that is adapted to the changing conditions, innovations in management, as well as value chains that promote sustainable and regenerative soil and land use.

While increasing biomass production is probably one of the oldest and most predominant soil related research subjects, we could only identify a surprisingly low number of related articles in our search. For example, agricultural growth is seen as the most important factor to reduce malnutrition, hunger and poverty (FAO, WFP & IFAD, 2012). The world’s increasing population and the need to produce food, feed, fiber and fuel (energy) from agricultural crops puts pressure on global soil resources and therefore enhances the need for research on biomass production increase (Gerzabek, 2014). The low number of identified soil related articles on this topic may be due to the fact that soil quality is so inextricably linked with biomass production that it has not even been made explicit and as a consequence main research focused on fertilizers, irrigation, pest control, genetics, etc. Recent transition to agroecology is now calling for new research on how soil and land management can increase biomass production as we should produce more with less external inputs. Another explanation for this low number of papers may also be due to an unsuitable choice of key words.

Biomass production related challenges differ significantly between regions with industrialized countries with high productivity needing to reduce external inputs and use of chemicals while maintaining production levels (IPES-Food, 2016) and many developing countries facing a need for actually increasing productivity (Tittonell & Giller, 2013). In recent years, the EU recognized the importance of trans-disciplinary, location specific solutions that are based on ecological principles, in order to address these challenges (European Commission, 2021c). Thus, we expect an increasing focus on inclusive, agroecological and regional research efforts.

Soil biodiversity increase seems to be a rather new topic area. Starting from 1988, biodiversity is an area of growing interest from 2010, not only for the scientific community but globally due to the international and European commitments in this matter (UN 2030 Agenda for Sustainable Development, European Green Deal, and the new EU Biodiversity Strategy for 2030). The International Initiative for the Conservation and Sustainable Use of Soil Biodiversity was established in 2002 (FAO, ITPS, GSBI, CBD & EC, 2020). The Status of the World's Soil Resources report (FAO & ITPS, 2015) examined the major threats to soil and included threats to soil biodiversity. Loss of biodiversity is not only an environmental issue, but also a developmental, economical, security, health, societal and ethical issue. This is illustrated by the Global Risks Report 2020 (World Economic Forum, 2020) that identifies biodiversity loss and ecosystem collapse within the top five major threats that may impact global prosperity in 2020 and over the next decade. Biodiversity aspects are closely linked to how we use soils and land (Karimi et al., 2020a; Christel et al. 2021). Thus, we expect increasing integrated biodiversity research that combines targeted soil and land management (e.g. agriculture, forestry, urban areas) with biodiversity remediation and conservation.

Increase of ecosystem services was by far the most recent topic area addressed in the identified literature with first articles from 2010. In spite of its importance, most studies (e.g. Costanza et al., 1997; de Groot et al., 2002; MEA, 2005) describe ecosystems with a focus on services rather in general terms (i.e., provisioning, supporting, regulating, and cultural services) with little emphasis on soil specifically. Hewitt et al. (2015) mentioned that soil is an overlooked component in ecosystem service-related studies and policy level decisions. However, since Dominati et al. (2010) created a basis for analyzing soil related ecosystem services, an increasing body of literature dealing with the importance and conceptual integration of soils into the ecosystem services approach has been published (Paul et al., 2021). Recently, increasing efforts go towards measurement, monitoring and monetization of ecosystem services in order to create markets and to compensate soil and land managers for ecosystem service restoring and maintaining efforts and related costs. A common example here are soil carbon credits (Paul et al., 2023), but also markets for other ecosystem services are increasing.

In terms of knowledge domains, 'data management & monitoring', 'assessment & modelling' are the main knowledge domains addressed. Those topics are crucial to provide the information needed to identify and locate the main degraded areas, define the right measures to improve soil condition and monitor their effects within time. This explains why they are the most investigated domains in literature and also why they are included as the main elements in the recent EC published proposal for a 'Directive of Soil Monitoring and Resilience' referred to as the 'Soil Monitoring Law' (European Commission, 2023). Intermediate attention was given to 'specific regions', 'specific land use and management practices', 'technical, economic & social innovation'. The knowledge domains 'institutions & governance', 'science-based policy support' and 'awareness, training & education' seem to be rather little discussed within

scientific literature. Potentially, the latter knowledge domains are more addressed in different forms of publications (e.g. reports, books) that were not included in this study. Nonetheless, Helming et al. (2018a) argues that soil-related governance is not as well understood as the governance of other natural resources such as water, air, and biodiversity. According to the authors, research needs yet to explore how different governance mechanisms and processes interact at all levels of administration, as well as which instruments are most relevant to the decisions made by practitioners. The authors further suggest that research should look into the role that property rights and tenure systems may have in influencing the efficiency of governance instruments.

Findings from this study demonstrate how the specific regions studied and the practices promoted vary across the eight societal challenges. Requirements for R&I in support of sustainable soil and land management are often specific to context, regional, or even local pedo-climatic and socio-economic conditions (Francis et al., 2003). In order to fully implement sustainable soil and land management, it is important to include smaller geographic regions and pedo-climatic zones – such as coastal, islands, mountain, karst, sub-arctic and arctic regions – in research efforts, e.g. in Living Labs (see also Arias-Navarro et al. (2023) and Bouma (2022)), and to exchange this specific knowledge on a global level (Löbmann et al., 2022). In our study, we found that some regions have been studied extensively such as the Mediterranean, coastal/islands, mountains and cities/brownfields. Conversely, the regions boreal, tropical, karts and peatlands seem to be less discussed within a soil context. A higher concentration of research institutes in regions such as the Mediterranean, coastal/ islands, mountains and cities/brownfields could be an explanation. Indeed, proportionally less research institutes are located in boreal, tropical, karst and peatland regions. More than three quarters of the articles identified in our study were published in the European Union, China and the United States. Only a small part of China and the United States is under tropical climate and no part of Europe is. Similarly, according to Xu et al. (2018), the majority of the world's peatlands are situated in Asia (38.4% mostly Russia) and North America (31.6%, mostly Canada & Alaska). Regarding the boreal regions, it includes only a few countries of the European Union (Sweden, Finland, Estonia, Latvia and Lithuania).

‘Reduce soil degradation’ is the societal challenge on which most articles were published, therefore also covering all regions except for peatland. This is surprising, since peatlands comprise important soil ecosystems. We presume that other key words, not used in this search dominate this discussion. Soil degradation through land take is closely linked to urban sprawl (Colsaet et al., 2018) which matches with our finding that the societal challenge ‘mitigate land take’ only covers the region ‘cities and brownfields’.

Regarding land use and management practices, agroforestry was often investigated and presented as a valuable option to increase biomass, mitigate/adapt to climate change, improve ecosystem services, control disaster and reduce soil degradation (Jose, 2009; Dollinger & Jose, 2018). Few proposed and studied solutions imply a rethinking of agricultural systems, e.g. by including livestock into arable systems, or developing agroforestry. Such diversification strategies have been demonstrated to promote soil health (Strauss et al., 2023) and ecosystem services of agricultural systems (Tamburini et al., 2020).

In our study, the articles we identified were mainly published in the European Union (30%), China (24%) and North America (24%). Within Europe, the United Kingdom followed by Germany and Spain are the countries who published the most articles with 7%, 5% and 4% respectively. The SCImago Journal & Country Rank portal (SCImago, 2023) shows that for all scientific categories combined, between 1996 and 2021 articles worldwide are published mainly in the European Union (26%) followed by the United States (21%) and China (12%). Within Europe, the United Kingdom followed by Germany and France are the countries who published the most articles with 6%, 5% and 4% respectively. This indicates that publication activities on soil related topics are above average in the EU, United States and China, thus indicating great interest in related research. Especially China seems to have a strong focus on soil related research as compared to other research activities, when compared to the global average. Indeed, with the nationwide sloping land conversion program, also known as ‘Grain for Green Project’ the Chinese Government initiated the world’s largest soil conservation program with focus on combating soil erosion (Xu et al., 2006).

CONCLUSION

Soil health remains crucial for delivering food security and many other important ecosystem services. The search for soil and land use-related scientific literature identified a large portfolio of publications. We could see a significant increase in publication activities related to soil and land use research, especially in recent years. Reduced soil degradation represents the major focus area of research and is closely linked to all other soil-related challenges, being the basis for soil capacity building. Our results highlight a transition from a conservation-oriented perspective to a service-oriented perspective on soil health, which may be better suited to integrate the social and economic dimensions of soil health improvement alongside the ecological dimension. Our study also confirmed that agricultural diversification such as agroforestry is a valuable option for increasing biomass, mitigating/adapting to climate change, improving ecosystem services, and reducing soil degradation.

Based on our findings we recommend to focus on research areas yet less covered as the societal challenges biodiversity and ecosystems services increase. Considering the different knowledge domains, we suggest to concentrate more on socio-economic and governance of soil and land as well as awareness, training and education - keeping in mind that our review process was restricted to soil and land, meaning that extending our research by including other domains as water or biodiversity may have revealed exiting knowledge adaptable to soil and land management. It would be relevant to consider such work in the future, if possible through the development of Living Labs and Lighthouses as supported by the Soil Mission because such organization constitute relevant bottom-up experimentation and learning tools that include a broad range of actors (producers, consumers, public research actors, farmers, foresters etc.) for inducing system transformations. It is a way of developing simultaneously biophysical, socio-economic and governance knowledge. Mixing the experience of all actors will also improve soil literacy.

2.2. Conclusion du chapitre 2

Ce chapitre établit un état des lieux des connaissances sur les enjeux qui visent à réduire les menaces pesant sur les sols et à renforcer les services écosystémiques qu'ils rendent. Ces défis ont été reclassés selon les quatre phases du cycle des connaissances : développement ; harmonisation, organisation et stockage ; transfert ; et application des connaissances. J'ai également organisé les défis sociétaux en deux catégories : d'une part, ceux portant sur la lutte contre les menaces pesant sur la santé des sols (réduction de la dégradation des sols et atténuation de l'artificialisation des sols), et d'autre part, les services écosystémiques que les sols fournissent (atténuation et adaptation au changement climatique, augmentation de la biodiversité, amélioration de la gestion des catastrophes, accroissement de la production de biomasse, et augmentation de la fourniture de services écosystémiques). En conséquence, la Figure 6 a été adaptée, afin d'illustrer la répartition de la littérature scientifique selon les phases du cycle des connaissances, en distinguant les contributions liées aux menaces et aux services écosystémiques (Figure 11).

Il en ressort que la phase de développement des connaissances est de loin la plus importante, avec une concentration importante de recherches visant l'acquisition des connaissances. Elle est suivie par la phase harmonisation, organisation et stockage des connaissances, principalement centrée sur l'évaluation et la modélisation, tandis que la gestion et le suivi des données y sont moins présents. Par contre, les phases de transfert et, surtout, d'application des connaissances demeurent largement sous-investies, ce qui limite l'impact des recherches sur le terrain. Renforcer ces phases est donc essentiel pour traduire les savoirs théoriques en actions applicables et soutenir une gestion durable des sols.

En ce qui concerne la répartition selon les types de défis sociétaux, les menaces, davantage étudiées dans la littérature sur les sols (Figure 1) et explorées depuis plus longtemps que les services, bénéficient d'une couverture approfondie dans les phases de développement et d'harmonisation. En revanche, les services écosystémiques montrent une couverture plus hétérogène : les aspects climatiques sont bien représentés, mais les connaissances liées à la biodiversité et aux services écosystémiques dans leur ensemble restent moins développées. La transition vers le transfert et l'application des connaissances est particulièrement limitée dans ces domaines, ce qui souligne l'importance de convertir les recherches théoriques en pratiques concrètes pour répondre aux enjeux de durabilité.

Dans les chapitres qui suivent, je procèderai à une analyse approfondie des trois phases du cycle des connaissances où les lacunes sont les plus marquées : l'harmonisation des données autour des questions de la surveillance de la santé des sols, le transfert et, surtout, l'application des connaissances.

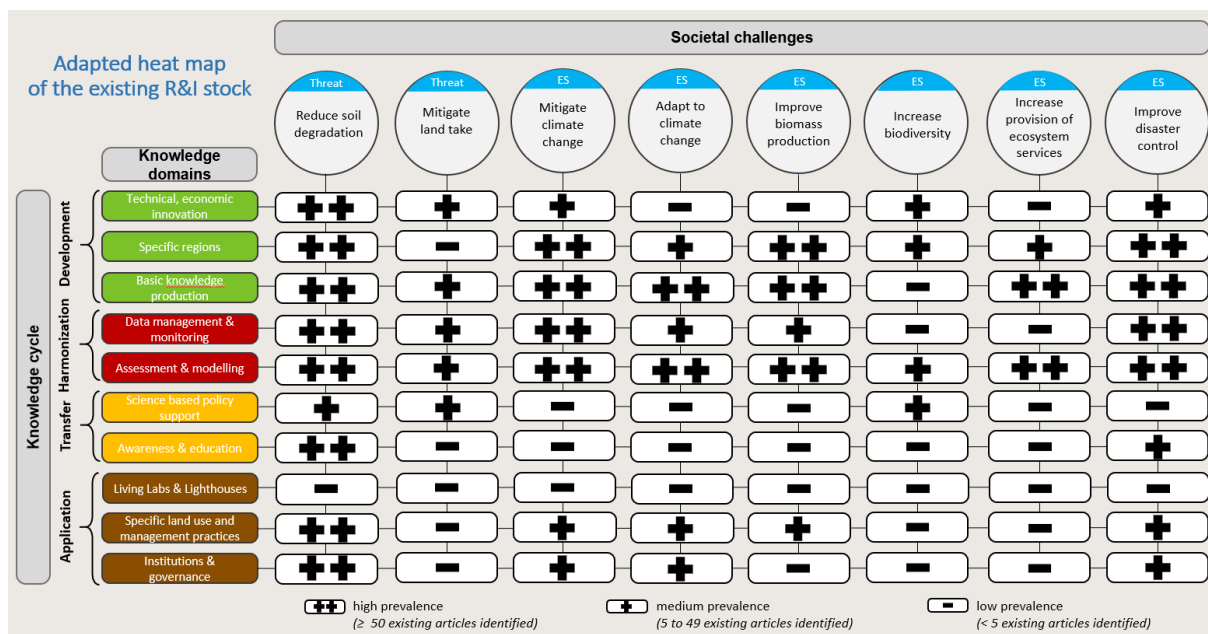


Figure 11 : Heat map indiquant la répartition de la littérature scientifique dans chaque phase du cycle de connaissances pour les connaissances sur la lutte contre les différentes menaces et les services écosystémiques rendus par les sols (ES) considérés dans cette étude (adaptée de la Figure 6, Mason et al, 2023c).

CHAPITRE 3 :

Harmonisation, organisation et stockage des données pour la surveillance de la santé des sols

Sommaire

3.1.	Introduction du chapitre 3	50
3.2.	Monitoring systems of agricultural soils across Europe in regards of the upcoming European Soil Monitoring Law	51
3.3.	Bilan des 20 premières années des productions scientifiques du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS)	65
3.4.	Scientific indicators and stakeholders' perceptions on soil threats in France: how do they compare?	82
3.5.	Conclusion du chapitre 3	98



**Harmonisation,
organisation et
stockage des
connaissances**

3.1. Introduction du chapitre 3

Le chapitre précédent a montré que, dans la phase d'harmonisation, d'organisation et de stockage des connaissances sur la lutte contre les menaces et les services écosystémiques rendus par les sols, l'accent est majoritairement mis sur l'évaluation et la modélisation, tandis que les aspects de gestion et de suivi des données restent relativement sous-investis.

Ce chapitre se concentre sur la phase d'harmonisation, organisation et stockage du cycle de ces connaissances, en explorant la surveillance des sols comme un levier essentiel pour la gestion durable des sols. Plus particulièrement, ce chapitre s'articule autour de trois articles qui explorent les dispositifs de surveillance des sols sous différents angles. Un premier article (en préparation) compare les systèmes de surveillance des sols de plusieurs pays européens en regard de la future directive sur la surveillance des sols (European Commission, 2023), en prenant en compte les méthodes d'échantillonnage et les paramètres/indicateurs mesurés, tout en explorant les opportunités d'harmonisation au niveau européen. Un second article examine l'utilisation qui est faite des données acquises par ces systèmes de surveillance à travers un exemple de système national de surveillance des sols : le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) en France. Cet article, publié en français dans la revue *Étude et Gestion des Sols*, met en évidence à la fois les réussites et les défis auxquels le RMQS est confronté.

Un aspect crucial de la caractérisation de la santé des sols, des menaces et des services écosystémiques réside dans le choix des indicateurs utilisés. La littérature propose une grande diversité d'indicateurs mais aucun consensus clair n'a encore émergé (Reyes-Rojas et al., en préparation). Le troisième article évalue ainsi la potentialité d'utiliser, en complément des indicateurs classiques mesurés par les systèmes de surveillance des sols, la perception des acteurs en prenant comme exemple l'évaluation des menaces pesant sur les sols sur le territoire français (soumis au *European Journal of Soil Science* fin juin 2024).

3.2. Monitoring systems of agricultural soils across Europe in regards of the upcoming European Soil Monitoring Law

Mason, E., Cornu, S., Arrouays, D., Fantappiè M., Jones, A., Götzinger, S., Spiegel, H., Oorts, K., Chartin, C., Borůvka, L., Pihlap, E., Putku, E., Heikkinen, J., Boulonne, L., Poeplau, C., Marx, M., Tagliaferri, E., Vinci, I., Leitans, L., Armolaitis, K., van Egmond, F., Kobza, J., Wetterlind, J., Drobnik, T., Hirte, J., & Bispo, A. (2025). Monitoring systems of agricultural soils across Europe in regards of the upcoming European Soil Monitoring Law. Article en préparation.

Article en préparation pour soumission à l'European Journal of Soil Science

L'article a été rédigé dans le cadre du programme EJP SOIL, et plus précisément dans le WP6 (Favoriser l'harmonisation des informations sur les sols) (**Annexe E**, Figure 1A).

INTRODUCTION

Life on Earth fundamentally relies on healthy soils. Soil health—defined by the Soil Mission 'A Soil Deal for Europe' as "the continued capacity of soils to support ecosystem services"—is crucial for maintaining ecological balance and supporting human well-being (Veerman et al., 2020). However, soils are increasingly under threat both in Europe and globally (FAO & ITPS, 2015), with an estimated 60% to 70% of European soils classified as unhealthy by 2020 (Panagos et al., 2024). This highlights an urgent need for reliable and consistent data on soil health, particularly for practitioners and policymakers striving to detect soil degradation at an early stage and promote sustainable management practices (Richer-de-Forges & Arrouays, 2010). Soil Monitoring Systems (SMSs) are essential for the systematic assessment of soil properties, enabling the detection of spatial and temporal changes (FAO/ECE, 1994). The design of a SMS involves several key decisions: (i) determining the appropriate timing and frequency of sampling; (ii) selecting sampling locations in order to well represent the soil variability; (iii) specifying the sampling depth and methodology, including whether to sample by pedogenic horizons or fixed depth increments, the tools used, and the collection of a single or composite sample; (iv) deciding what to analyse and the methods for preparation and laboratory analysis; and (v) ensuring the collection and storage of relevant metadata to enable accurate interpretation of the results.

Most EU Member States have designed and established one or more Soil Monitoring Systems within their countries, though the specifics of these systems differ between countries. Several studies underlined the challenges in comparing and sharing data between SMSs, either due to technical discrepancies (e.g., differences in sampling strategies, analytical methods, and data format), but also due to costs and legal requirements (Morvan et al., 2008; van Leeuwen et al., 2017; Cornu et al., 2023; Froger et al., 2024; Meurer et al., 2024). In parallel, the Joint Research Centre of the European Commission (EU-JRC) developed its own monitoring system, the '*Land Use/Cover Area frame statistical Survey Soil*' (LUCAS Soil), to report on the state of soils across Europe (Orgiazzi et al., 2018). LUCAS Soil provides a harmonized approach to the collection and analysis of soil samples throughout the EU, with results displayed on the EU Soil Observatory (EUSO) Soil Health Dashboard. However, recent findings by Froger et al. (2024) reveal significant variability between LUCAS Soil and national SMSs, with national systems generally covering a broader range of land covers, soil types, and regions. Key soil parameters, including pH, carbon, and clay content, also showed marked differences between LUCAS and national systems. This underscores the critical need for harmonizing SMSs across EU Member States to achieve comparable evaluations of soil health at the European level.

This need for harmonization aligns with broader European objectives to safeguard soil health. Central to these efforts is the EU Soil Strategy for 2030 (European Commission, 2021a), which aims to ensure that all EU soils are in healthy condition by 2050. To support this goal, the European Commission proposed the Soil Monitoring and Resilience Directive (European Commission, 2023), commonly referred to as the Soil Monitoring Law (SML). This directive aims to establish a unified legal framework to enable systematic monitoring of soil health and land use across Member States while promoting sustainable soil management practices. Its primary objective is to achieve a coordinated and standardized approach across Europe,

enabling consistency, comparability, and transparency in soil data collection. Although not yet adopted, the proposed directive sets forth specific requirements for soil sampling and analysis to address existing discrepancies and enable harmonized soil health assessments in Member States (European Commission, 2023). This raises a critical challenge: how do current SMSs reflect the principles outlined in the SML? Additionally, what updates might be needed to further enhance their contribution to a unified European soil monitoring framework?

By examining how SMSs from the 24 European Member States participating in the EJP SOIL program (www.ejpsoil.eu) address the proposed requirements of the SML, this research aims to: (i) establish an overview of existing SMSs focused on agricultural soils; (ii) examine the extent to which these systems reflect the proposed SML's objectives; (iii) identify potential challenges or areas where current SMSs could evolve to support the SML's implementation; and (iv) propose actionable recommendations to harmonize SMSs across the EU. This paper provides a foundation for guiding the implementation of the SML and advancing coordinated soil monitoring practices across Europe.

MATERIAL AND METHODS

Design and implementation of a survey to report SMSs

To review Soil Monitoring Systems (SMSs) across the EJP SOIL countries, a web-based survey was conducted (Bispo et al., 2021). Experts from each of the 24 participating countries (Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, the Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey, and United Kingdom), as well as the EU-JRC, were invited to complete the online survey. The survey was designed to gather detailed information about the SMSs present in each one of the EJP SOIL countries, focusing on the sampling protocols and the soil analytical methods, to identify similarities and differences. The survey started with questions to identify the name, objectives and land-use scope of each SMS. Secondly, experts were asked for information on the temporal and spatial sampling protocols used in the monitoring systems. Thirdly, details on the parameters measured and the soil analysis methods employed were asked for. Fourth, stakeholders were asked to provide insights into potential harmonization options, indicating which aspects of their protocols could be adapted or modified. Finally, experts were asked to describe existing or planned collaborations with LUCAS Soil monitoring program.

Following a pre-test phase and subsequent adjustments, the survey was launched in April 2021 and remained open for two months, closing in June 2021. It was administered via an online survey platform. After data collection, thorough data cleaning was conducted to identify and correct any errors or omissions. In August 2024, the survey was newly expanded to allow countries to verify and complete any missing information related to their Soil Monitoring Systems. Additional questions were included to gather details on the methods used to measure soil parameters and to determine whether any new or previously overlooked SMS should be added (**Annex B**).

Reported SMS

A total of 28 existing SMSs, including LUCAS Soil for the EU, were reported across 18 countries and the EU (Figure 12). These countries include Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Hungary, Italy, Latvia, Lithuania, the Netherlands, Poland, Slovakia, Spain, Sweden, and Switzerland. To be included in this study, each SMS had to meet specific criteria. While the Soil Monitoring Law addresses all types of land use, EJP SOIL narrows its scope to agricultural soils. Consequently, this study excludes SMSs that focus solely on other land uses (e.g., the Swedish Forest Soil Inventory and the Forest Soil Monitoring in Estonia). However, it is important to note that some of the reported SMSs encompass multiple land uses, including but not limited to agricultural soils, as certain countries' Soil Monitoring Systems (e.g., France) do not systematically separate these categories. Additionally, at least one monitoring campaign must have been conducted, with future measurements planned or feasible if only one campaign has occurred (excluding Spain due to a lack of follow-up measurements) (Morvan et al., 2008).

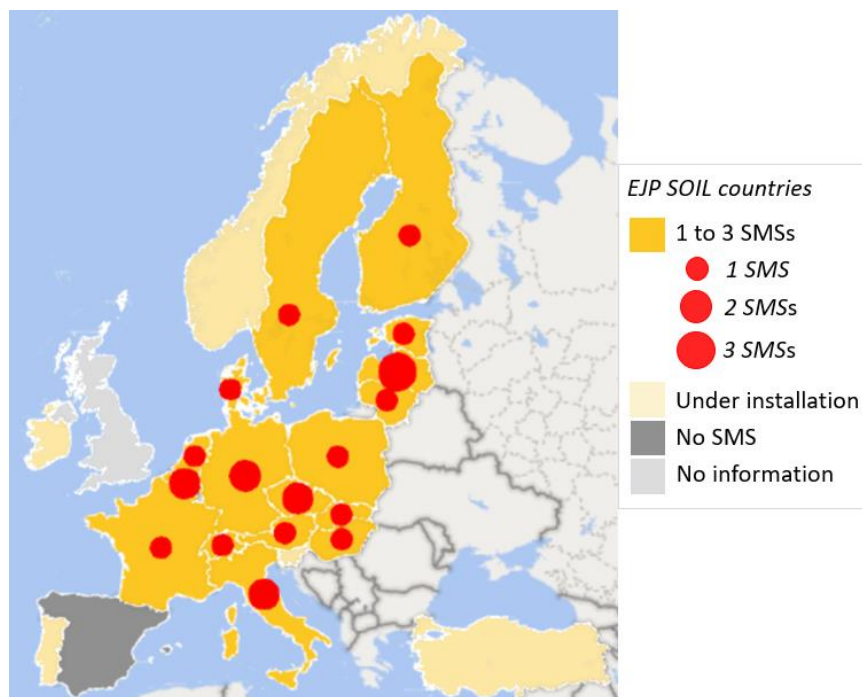


Figure 12: Geographical distribution of SMSs included in the survey conducted across EJP SOIL countries. LUCAS Soil for the EU is not represented.

It is important to note that Portugal, Turkey, Norway, and Slovenia reported not having an SMS in place, though negotiations are ongoing to establish one (e.g. in Portugal and Norway). Similarly, Ireland has initiated a national baseline, but has yet to fully implement a monitoring system. No data was collected from the United Kingdom. Additionally, in some countries, soil monitoring is conducted at the sub-national level, under the jurisdiction of regional authorities (e.g., Italy and Belgium). Some countries also operate multiple SMSs focused on different parameters, as is the case in the Czech Republic, Germany, and Latvia. After applying the inclusion and exclusion criteria, we were left with 24 SMSs from 17 countries and LUCAS Soil for the EU.

RESULTS

Comparative analysis of SMS's sampling strategies in relation to the SML

Sampling design

The spatial distribution of sampling sites is a critical component in the design of Soil Monitoring Systems. The SML specifies that the sampling approach should follow a stratified random scheme defining soil units, being the combination of soil type and land use. Those units are sampled and the results have to be reported at soil district level, which are operational units to be defined by each country and could typically correspond to Nomenclature of Units for Territorial Statistics (NUTS) level 1 or 2. In addition, “the number and location of the sampling points shall represent the variability of the chosen soil parameters within the soil units with a maximum percent error of 5%”. An analysis of the reported SMSs reveals varying levels of compatibility with these requirements:

(i) The sampling design of the different SMS follows either a grid-based design, or a stratified approach. The latter is used by 57% of systems (13/23) (Table 4). In these systems, site selection is based on a soil criterion in most cases combined or not with other criteria, such as land use and climatic conditions (Czech Republic_BMP), geographical and soil settings (Hungary), soil types and management practices (Italy_Lombardia), soil types and texture (Poland), soil and groundwater classes (Netherlands), soil maps, land use, and impacts (Italy_Veneto), with the notable exception of Belgium_Flanders that is only based on land use. For Belgium_Wallonia, the three Latvian systems, Lithuania, and Switzerland, the criteria used were not specified. The remaining 26% of the SMSs follow a regular grid sampling approach, with cell sizes varying between SMSs (26%, 6/23). This raises the question of whether the number of samples is sufficient to accurately represent the diversity of soil units within each SMS. Finally, 17% (4/23) of the systems (EU, Finland, Germany_BD, and Slovakia) have a combination of both designs. In the EU system, site selection is first based on a regular grid but the choice of the cells to be sampled are then stratified according to land cover type, defined by the area-frame, and does not consider soil type.

(ii) The SML mandates soil monitoring across all land use types, including agricultural, forested, natural, and urban areas. Only 42% of the SMS monitor a large range of land uses. In 58% (14/24) of cases, SMSs focus exclusively on agricultural soils (Table 4). This narrower focus highlights potential gaps in addressing the comprehensive scope envisioned by the SML. Indeed, while some countries may have separate SMSs for non-agricultural land uses, such a separation contributes to greater heterogeneity in soil health assessment and makes it more challenging to compare results across land uses, even within a country.

(iii) Our analysis reveals a significant variation in the number of sampling sites per SMS, ranging from 30 sites in Estonia to 70,000 in Czech Republic_agro (Table 4). This variation in the number of sampling sites is further reflected in the density of monitoring efforts, measured as the number of km² represented by one monitoring site within each SMS (Figure 13). For example, the Czech Republic_agro, with its high number of sampling sites, monitors approximately 1 km² per site, indicating an intensive sampling network within the monitored area. In contrast, countries like Poland or Germany_BD monitor one site for over 400 km², reflecting a much sparser sampling density across their respective monitored surfaces.

Table 4: Description of the reported SMSs, categorized by the: (i) monitoring objectives, where *pH* represents pH and nutrient monitoring, *SQ* general soil quality monitoring, and *SOC* Soil Organic Carbon monitoring; (ii) aggregated data accessibility, where *Yes* indicates data freely available, *No* indicates data not yet available or restricted, and *Req* indicates data available upon request; (iii) availability of soil management data; (iv) temporal sampling, including the starting year, whether the SMS is still operational, and the interval between campaigns (in years); and (v) spatial sampling, including the number of sampling sites, the sampling design type (*Strat* = stratified representative sites, *Grid*, *Mix* = mixed approach combining both), the monitored land uses (*All* = all types or *Agri* = only agricultural), the sampling depth type (one or several fixed, or depth according to soil horizons), and the number of samples per depth for a composite sample.

SMSs	General description				Temporal sampling			Spatial sampling				
	Name of the monitoring system	Aim	Data access	Management data	Starting year	Still running	Interval (years)	Number of sites	Design type	Land uses	Depth type	Number samples
EU	LUCAS Soil	SQ	Yes/No¹	Yes	2009	Yes	3-4	25 000	Mix	All	One	5
Austria	Soil inventory (BZI)	SQ		No	1990	Yes	10	2 000	Grid	All	Several	4
Belgium_Flanders	Flemish soil organic carbon monitoring network (Cmon)	SOC	No	Yes	2021	Yes	10	2 595	Strat	All	Several	
Belgium_Wallonia	Total soil organic carbon (CARBIOSOLS)	SOC	Yes	Yes	2004	No	10	590	Strat	Agri	Horizons	5
Czech Republic_agro	Agrochemical soil testing network	SQ	Req	No	1962	Yes	≈6	420 000		Agri	One	30
Czech Republic_BMP	Basal soil monitoring (BMP)	SQ	Req	No	1992	Yes	6	214	Strat	Agri	Several	6
Denmark	Danish national square grid (NSG)	SOC		Yes	1986	Yes	4	450	Grid	Agri	Several	10
Estonia	Agricultural soil monitoring	SQ	Yes	Yes	1983	Yes	5	30	Grid	Agri	Horizons	
Finland	Monitoring of arable soil chemical quality (Valse)	SQ	No	Yes	1974	Yes	≈10	630	Mix	Agri	One	10-20
France	French soil monitoring network (RMQS)	SQ	Yes	Yes	2000	Yes	≈15	2 241	Grid	All	Several	25
Germany_BZE-LW	Agricultural soil condition survey (BZE-LW)	SOC	Yes	Yes	2011	Yes	10-12	3 104	Grid	Agri	Several	9
Germany_BD	Permanent soil monitoring in Germany (BD)	SQ		Yes	1985	Yes	4-5	800	Mix	All	Horizons	15-20
Hungary	Hungarian soil information and monitoring system (TIM)	SQ		Yes	1992	Yes	1	1 236	Strat	All	Several	1
Italy_Lombardia	Regional soil nutrients monitoring network	pH		No	2010	Yes	1	120	Strat	Agri	Several	5
Italy_Veneto	ARPAV_UOQS	SQ	No	Yes	2012	Yes	5 or 1 ²	100	Strat	All	One	3 or 16 ²
Latvia_agro	Soil agrochemical research in representative sample frame	SQ	No	Yes	2018	Yes	1	6 250	Strat	Agri	One	10-20
Latvia_nitrogen	Mineral nitrogen monitoring	pH	Yes	Yes	2006	Yes	1	48	Strat	Agri	Several	10
Latvia_carbon	SOC monitoring in representative sample frame	SOC	No	Yes	2018	Yes	1	100	Strat	Agri	Several	5
Lituania	Monitoring of soil agrochemical properties	SQ	Yes	Yes	1993	No	≈5	10 000	Strat	Agri	One	15-20
Netherlands	Netherlands Soil Sampling Program (NSSP)	SQ	No	No	1998	Yes	≈15	1 392	Strat	All	Several	5
Poland	Monitoring of Arable soils of Poland (MChG)	SQ		No	1995	Yes	5	216	Strat	Agri	One	20
Slovakia	Partial soil monitoring system (ČMS-P)	SQ		No	1993	Yes	5	430	Mix	All	Several	3 or 5 ³
Sweden	Swedish soil & crop inventory	SQ	No	Yes	1995 ⁴	Yes	10	2 000	Grid	Agri	One	10
Switzerland	Swiss Soil Monitoring Network (NABO)	SQ	Req	Yes	1984	Yes	5	114	Strat	All	One	25

¹ While most data are freely accessible, access to contaminant-related data is restricted.

² 1-year interval and 3 samples per depth for biological quality / 5-year interval and 16 samples per depth for nitrates and heavy metals.

³ 5 samples for chemical analysis and 3 samples for physical analysis.

⁴ In 1995, sampling was conducted without georeferenced locations; however, since 2001, a standardized set of georeferenced sampling sites has been established.

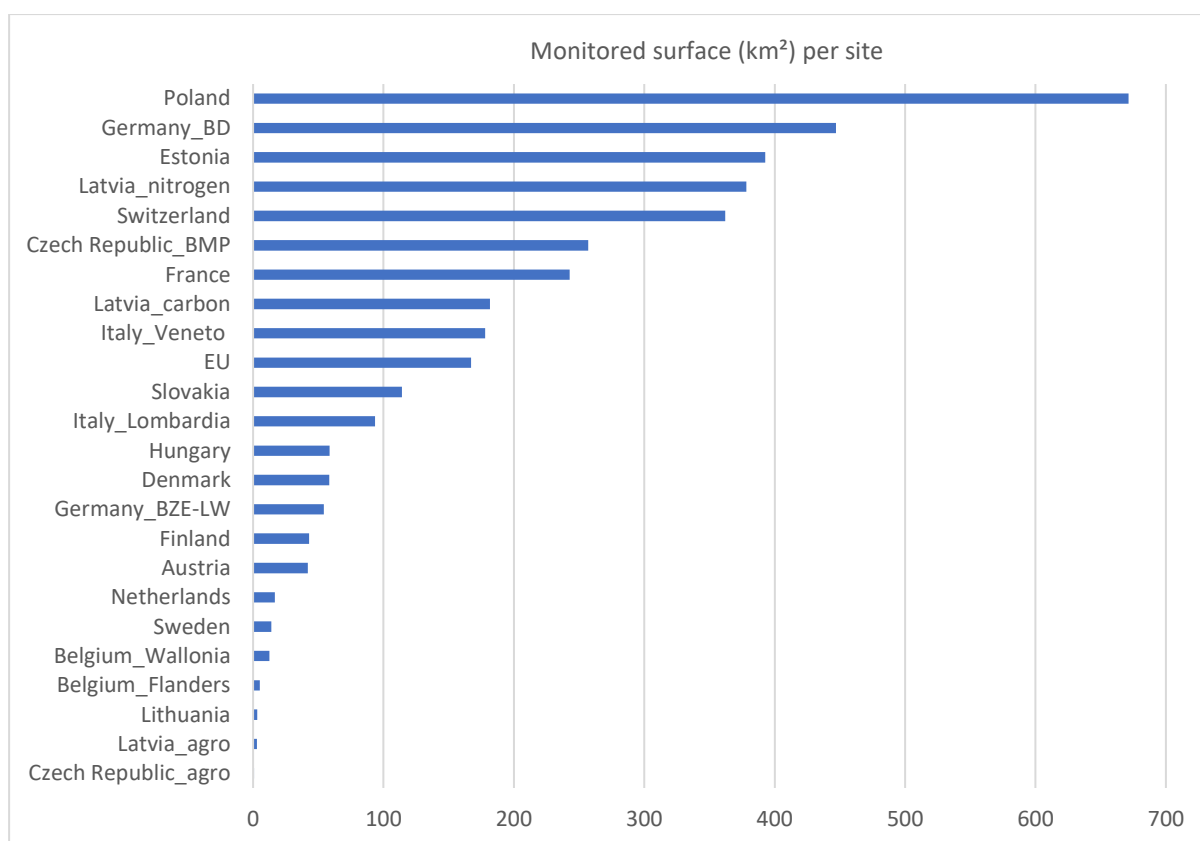


Figure 13: Distribution of monitored km² per sampling sites across SMSs.

Sampling collection

The SML specifies that at least five subsamples should be collected to a depth of at least 30 cm, homogenized to create a composite sample, and data reported by fixed depth. Additionally, the SML requires that “exact sampling locations should be sampled”. An analysis of the reported SMSs reveals varying levels of compatibility with these requirements:

(i) Composite sampling is performed in all systems except Germany_BZE-LW, where it is not used, and Estonia, where it is applied specifically for heavy metals and pesticide residues. Among the SMSs conducting composite sampling, the majority (77%, 17/22) collect at least five subsamples (Table 4). Exceptions include Austria and Hungary, which collect fewer than five subsamples, and Slovakia and Italy_Veneto, where the number depends on the parameter analyzed. Belgium_Flanders did not provide details on its collection procedure.

(ii) Half of the SMSs (12/24) use multiple fixed-depth intervals, while nine systems sample only at one fixed depth (the topsoil), and three systems rely on pedogenic horizons (Table 4). Among SMSs with fixed depths, sampling ranges from shallow layers (e.g., 0–10 cm) to deeper profiles up to 100 cm (Figure 14). Less than half of the SMSs (10/21) currently sample to the depth of 30 cm as specified in the SML. Three systems (both Czech Republic systems and Italy_Veneto) apply this depth for specific crops or parameters, while eight systems use shallower sampling depths.

(iii) In terms of sampling location, all SMSs in this study now use GPS coordinates to ensure precise geolocation, with two exceptions: in Germany_BD, GPS use is recommended but not mandatory in all cases, and in the Netherlands, it was implemented only during the 2018 campaign.

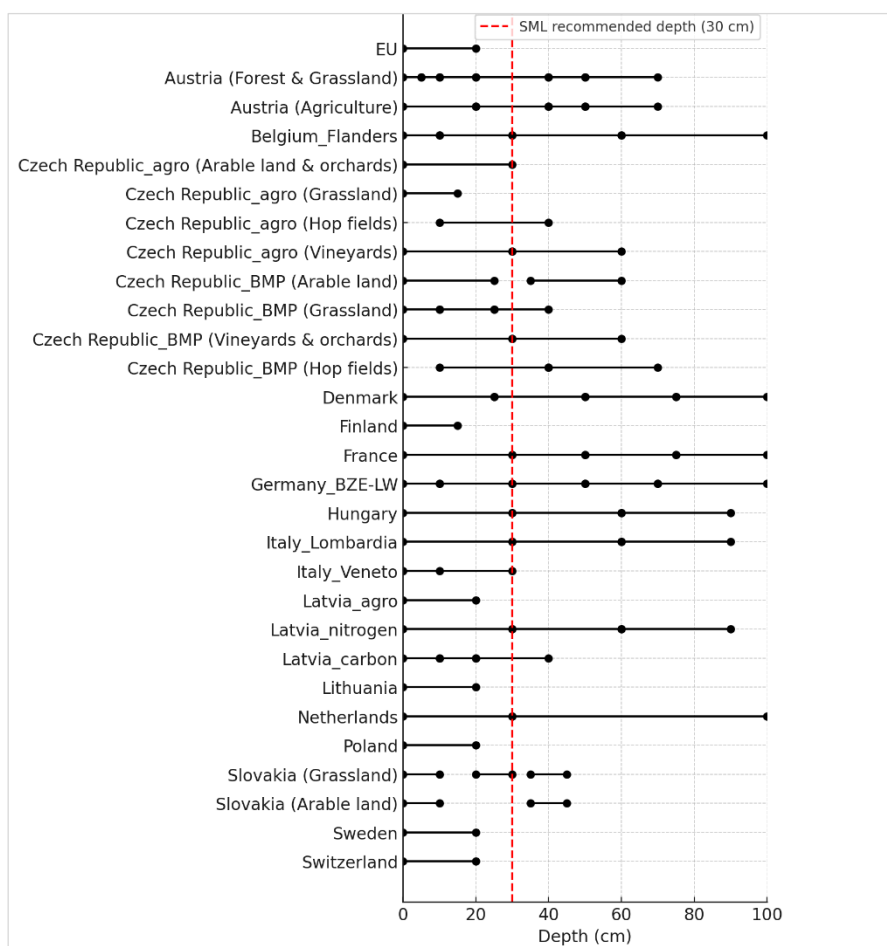


Figure 14: Soil sampling depth intervals by country and land use for SMSs reporting one or more fixed soil depths. Each horizontal line represents the depth intervals specific to a given SMS, with distinctions made for different land uses where applicable. The red dashed line indicates the SML’s recommended sampling depth of 30 cm. For Italy_Veneto¹, the one fixed depth varies: 0–10 cm for biological quality assessments, and 0–30 cm for nitrates and heavy metals.

Sampling return time

The proposed Soil Monitoring Law specifies that “new soil measurements are performed every six years, within one sampling campaign or as part of a continuous sampling scheme during the indicated period of time.” Among the 24 reported SMSs, 22 remain operational, while two (Lithuania and Belgium-Wallonia) have been discontinued (Table 4). Lithuania is planning a new campaign to re-establish monitoring, and Belgium-Wallonia is developing a new system to align with the SML. Sampling intervals between consecutive campaigns among the SMSs vary widely, ranging from annual campaigns to intervals exceeding 15 years. Most systems (67%, 16/24) operate within the six-year interval suggested by the SML, including LUCAS Soil, which samples every 3 to 4 years. However, seven SMSs (Austria, both Belgium systems, France, Germany_BZE-LW, the Netherlands, and Sweden) operate with intervals longer than 6 years. Additionally, the majority of these systems (13/24) were established in or before 1995, demonstrating a long-standing commitment to soil monitoring.

Information to be recorded in the field

In terms of field data, the SML emphasizes the importance of closely monitoring “the impact of soil management practices and adjust recommendations as necessary” and recording the soil type. 71% of SMSs (17/24) collect data on soil management practices (Table 4). This includes

information gathered through interviews or surveys with farmers or land planners, covering aspects such as inter-campaign periods, historical land management, crop rotations, crop management, tillage practices, and multiple land uses. Additionally, 58% of SMSs (14/24) record soil type. Among these, 11 SMSs rely on national classification standards (Belgium_Wallonia, Czech Republic_BMP, France, Germany_BZE-LW, Germany_BD, Hungary, Italy_Veneto, Lithuania, Netherlands, Slovakia, and Switzerland), two use the World Reference Base for Soil Resources (WRB) classification (EU and Denmark), and one (Estonia) combines national standards with the WRB.

Comparative analysis of SMS's parameters analysed and corresponding analytical methods in relation to the SML

The 24 recorded SMSs serve a range of objectives (Table 4). The majority (71%, 17/24) focus on general soil quality monitoring. However, a notable portion (21%, 5/24) is specifically designed for monitoring soil organic carbon (SOC), as seen in systems from Belgium (Flanders and Wallonia), Denmark, Latvia (carbon) and Germany (BZE-LW). Additionally, 8% (2/24) of the SMSs, such as those in Latvia (nitrogen) and Italy (Lombardia), primarily target soil pH and nutrient content. The SML recommends the analysis of specific soil parameters, including physical, chemical, and biological properties, to assess soil health (Table 5). Parameters monitored across SMSs are categorized based on the number of systems that measure them: widely measured, moderately measured, and rarely measured. We considered as widely measured parameters those assessed by more than half of the SMSs. These include organic carbon (92%, 22/24), particle size distribution, and extractable phosphorus (each 71%, 17/24). Bulk density (subsoil) is measured by 58% of systems (14/24), while total nitrogen content, effective cation exchange capacity (ECEC), carbonate content, bulk density (topsoil), and heavy metals are each monitored by 54% (13/24). Moderately measured parameters include electrical conductivity (38%, 9/24) and pH. For pH, the SML recommends using water, KCl, and CaCl₂ as extraction media. Among SMSs, water is the most commonly used medium (12 systems, 50%), while KCl and CaCl₂ are each used by 7 systems (29%). Soil organisms (29%, 7/24) and organic contaminants (25%, 6/24) are also moderately measured. Rarely measured parameters are included in fewer than 10% of SMSs and comprise soil water holding capacity and saturated hydraulic conductivity (each 8%, 2/24).

Even among the widely measured parameters, significant variability exists in the methodologies applied across SMSs, which complicates the harmonization of soil health assessments. To address these differences, the SML recommends specific reference methodologies for measuring these parameters, most of which are ISO-based, although alternative methods are specified in some cases, such as for extractable phosphorus. Methodologies applied to parameters frequently monitored across SMSs are examined (Table 6). Overall, parameters such as bulk density in topsoil (7/13), bulk density in subsoil (6/14), total nitrogen content (5/13), and organic carbon (8/22) show broader adoption of ISO standards compared to others like particle size distribution (4/17), effective cation exchange capacity (ECEC) (3/13), heavy metals (3/13), and extractable phosphorus (3/17). These results indicate that while the Soil Monitoring Law has chosen the use of one or two ISO methods to standardize soil data collection across Europe, many SMSs rely on alternative methods. It is nevertheless to be noted that among these alternative methods some are considered as comparable.

Table 5: Parameters recommended by the SML and number of SMS measuring each parameter (n=24).

<i>Parameters monitored</i>	<i>Number of SMSs measuring each parameter</i>
pH	Water: 12, KCl: 7, CaCl ₂ : 7
Particle size distribution	17
Effective cation exchange capacity (ECEC)	13
Electrical conductivity	9
Bulk density	Topsoil: 13, Subsoil: 14
Soil water holding capacity	2
Saturated hydraulic conductivity (Ksat)	2
Organic carbon	22
Carbonate content	13
Soil organisms	7
Heavy metals	13
Organic contaminants	6
Total nitrogen content	13
Extractable phosphorus	17

Table 6: Overview of methodologies used to measure parameters widely monitored across the SMSs, showing their alignment with ISO-recommended methods outlined in the SML. SMSs are categorized by ISO-recommended, comparable, or alternative methods, with parentheses indicating the number of SMSs per category. *Abbreviations:* AT: Austria; BE¹: Belgium_Flanders; BE²: Belgium_Wallonia; CZ¹: Czech Republic_agro; CZ²: Czech Republic_BMP; DK: Denmark; EE: Estonia; EU: LUCAS Soil; FI: Finland; FR: France; DE¹: Germany_BZE-LW; DE²: Germany_BD; HU: Hungary; IT¹: Italy_Lombardia; IT²: Italy_Veneto; LT: Lithuania; LV¹: Latvia_agro; LV²: Latvia_nitrogen; LV³: Latvia_carbon; NL: Netherlands; PL: Poland; SK: Slovakia; SE: Sweden; CH: Switzerland.

<i>Parameters monitored</i>	<i>ISO recommended methods</i>	<i>the recommended ISO methods</i>	<i>SMSs using comparable methods</i>	<i>alternative methods</i>
Particle size distribution	11277	EU, EE, DE ¹ , DE ² (#4)		AT, BE ¹ , CZ ² , FI, FR, HU, IT ¹ , IT ² , LT, PL, SK, SE, CH (#13)
ECEC	11260	EU, DE ¹ , SE (#3)		CZ ¹ , CZ ² , FR, DE ² , HU, IT ¹ , IT ² , PL, SK, CH (#10)
Bulk density (Topsoil)	11272	BE ² , FR, DE ¹ , DE ² , EE, IT ² , LT (#7)	EU (#1)	AT, BE ¹ , HU, LV ³ , CH (#5)
Bulk density (Subsoil)	11272	BE ² , FR, DE ¹ , DE ² , IT ² , LT (#6)	EU (#1)	AT, BE ¹ , CZ ² , HU, LV ³ , SK, CH (#7)
Organic carbon	10694	EU, BE ¹ , BE ² , EE, FR, DE ¹ , LT, SE (#8)	IT ² (#1)	AT, CZ ¹ , CZ ² , DK, FI, DE ² , HU, IT ¹ , LV ¹ , LV ³ , PL, SK, CH (#13)
Carbonate content	10693	EU, FR, DE ² , SK (#4)		AT, BE ² , CZ ¹ , DE ¹ , HU, IT ² , PL, SE, CH (#9)
Heavy metals	54321 ¹	AT, FR, IT ² (#3)		EU, CZ ² , EE, FI, DE ² , IT ¹ , PL, SK, SE, CH (#10)
Total nitrogen content	11261 / 13878	EU, BE ¹ , FR, IT ² , SE (#5)	AT, DE ¹ , DE ² , CH (#4)	CZ ² , DK, FI, IT ¹ (#4)
Extractable phosphorus	11263 ²	EU, FR, IT ² (#3)		AT, CZ ¹ , CZ ² , DK, EE, FI, DE ² , IT ¹ , LV ¹ , LT, PL, SK, SE, CH (#14)

¹ Heavy metals (As, Sb, Cd, Co, Cr (total), Cu, Hg, Pb, Ni, Tl, Zn) should be measured using ISO 54321 digestion (with Aqua Regia), with optional analysis of bioavailable fractions using ISO 17586 (dilute nitric acid).

² ISO 11263 is the preferred method, nevertheless, others methods can be used as an alternative.

Comparative analysis of SMS's data accessibility in relation to the SML

The SML requires Member States to make monitoring results publicly accessible as aggregated data. Among the reported systems, only 41% (7/17) of the reported SMSs currently provide freely accessible data as aggregated data (Table 4). Data from three systems (both Czech Republic systems and Switzerland) can be obtained upon request, while seven systems (Belgium_Flanders, Finland, Italy_Veneto, Latvia_agro, Latvia_carbon, Netherlands, and Sweden) either restrict access or do not offer it at all. Notably, LUCAS Soil and Switzerland offer free access to most data, though access to contaminant-related data remains restricted.

DISCUSSION

Most European Member States have established one or more SMSs, but these systems exhibit significant differences in their sampling strategies and protocols, making results difficult to compare between Member States (Bispo et al., 2021). These differences are shaped by national priorities, environmental conditions, and resource constraints, reflecting the unique contexts of each system design. While some SMSs monitor a broad range of parameters, others are limited to specific parameters, such as organic carbon, pH, or nutrients, leaving other critical soil health aspects unaddressed. This variability highlights disparities in priorities and capabilities among SMSs, as well as potential gaps in monitoring soil health.

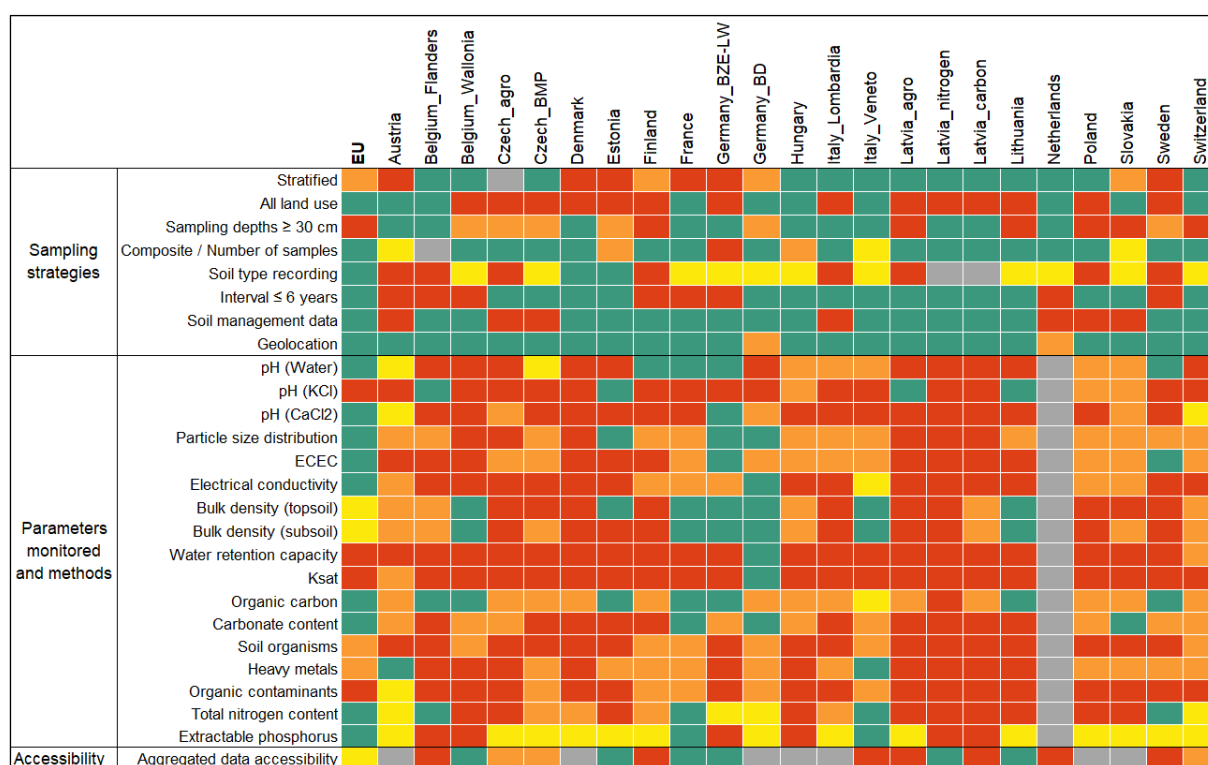


Figure 15: Similarities of Soil Monitoring Systems (SMSs) with the Soil Monitoring Law (SML) across sampling strategies, parameters monitored, methods, and data accessibility. Colors indicate levels of similarity: green (very high similarity), yellow (high similarity), orange (moderate similarity), red (low similarity), and gray (no information).

The extent to which SMSs reflect the principles proposed in the SML varies depending on the specific criteria evaluated (Figure 15), with LUCAS Soil being the system most comparable to the SML framework. This similarity is unsurprising, given that the SML was partially built upon the methodology developed by LUCAS. However, the extent to which SMSs address the proposed SML criteria varies depending on the specific criteria evaluated. For instance, within sampling strategies, the highest similarity is observed for composite sampling and information to be recorded, with most SMSs already meeting or exceeding the SML's requirements. However, challenges are more apparent for sampling depth, with many SMSs not reaching the minimum proposed depth of 30 cm. Similarly, for parameters monitored and measured, while certain key indicators like soil organic carbon are widely monitored, most SMSs do not measure all required parameters, or do not fully use the SML's recommended methods. The observed variability emphasizes the urgent need to address key gaps and inconsistencies to align SMSs with the requirements of the upcoming SML. Harmonizing SMSs in light of the upcoming SML will require balancing the establishment of harmonized monitoring standards with the need to respect and adapt existing national systems. A closer examination of specific criteria is essential to better assess compliance and identify areas requiring improvements. In this context, LUCAS Soil, as the SMS most similar to the proposed SML requirements (Figure 15), has been proposed as a benchmark for inter-comparisons, serving as a foundation for harmonizing SMSs. This approach has received strong support from experts, with 20 out of 21 expressing a willingness to collaborate with LUCAS Soil campaigns. Despite this enthusiasm, very few experts (3/21) expressed readiness to make substantial changes to their established SMS protocols, citing the rigidity of long-standing systems and the need to maintain historical data comparability. Budgetary constraints remain a major obstacle, with several experts (7/21) highlighting the financial difficulties of maintaining even existing systems.

Nevertheless, many experts (11/21) showed openness to adding new monitoring sites to improve spatial coverage. The spatial distribution of sampling sites is crucial for capturing representative soil health data. The SML requires sampling points to reflect the variability of soil parameters within soil units, which are subsets of broader soil districts—operational units typically aligned with NUTS level 1 or 2. However, while the SML also limits error to 5%, it provides no specific guidance on the number of points required per soil unit, complicating compliance evaluation and SMS design. The ENVASSO project recommends a minimum sampling density of one site per 300 km² to ensure adequate spatial coverage (Morvan et al., 2008). While most countries (79%, 19/24) meet this threshold, others, including Poland, Germany_BD, Estonia, Latvia_nitrogen, and Switzerland, fall significantly short.

Grid-based sampling approaches, employed by several countries, raise further questions about whether such designs can be adapted to meet the SML's stratification requirements. The example of France and the Czech Republic illustrates these challenges, with France highlighting the difficulties posed by high pedo-climatic diversity (Minasny et al., 2010) and the Czech Republic demonstrating the benefits of a dense sampling network. France's RMQS network currently monitors 2 241 points across 13 administrative regions (NUTS level 1). Assuming an average stratification of 14 soil types and 3 major land uses, this results in:

$$\text{Number of soil units} = 13 \times 14 \times 3 = 546$$

Given 2,241 total points, this corresponds to an average of just 4 points per soil unit - insufficient to adequately capture soil variability. Addressing these gaps could follow two

complementary approaches: adding new points to improve representation of soil units, integrating LUCAS points to support harmonization efforts, or likely a combination of both.

Most systems differ from the proposed SML guidelines in terms of sampling procedures, parameter selection, and measurement methods, making it challenging to compare results across SMSs and with the SML framework. One way to address this challenge is through double sampling during the LUCAS Soil Campaign, where soil samples are collected following both the LUCAS protocol and the SMS-specific protocol. This is complemented by double analysis, in which the samples are analyzed using both the SMS-specific methods and the LUCAS methods for the various parameters. This approach enables the testing and validation of transfer functions, which can be used to convert results obtained with one method into an equivalent result for another. For example, pedotransfer functions have been developed to standardize pH measurements from KCl to CaCl₂ (Kabała et al., 2016). The lack of harmonization in laboratory methods across the EU further complicates the comparability of soil data. To address this, the SML proposes the inclusion of minimum requirements for quality control in laboratories analyzing soil samples. Additionally, applying validated transfer functions could further enhance comparability between laboratories, providing a practical pathway to align datasets generated using diverse methods across SMSs.

Another potential method to harmonize soil health assessments across SMSs in line with the SML requirements is the use of a scoring approach. This approach, used in countries like the United States and Canada, involves translating raw soil measurements into scores based on the relationship between indicators and relevant soil functions (Fine et al., 2017; Amgain et al., 2022; Gauthier et al., 2023). These individual scores are then aggregated into an overall soil health score, providing an evaluation of soil health. Importantly, scoring systems can be adapted to local contexts by incorporating regional variations in soil types, pedo-climatic conditions, land use, and management practices. In Europe, initiatives like EJP SOIL are testing data-driven scoring systems based on the statistical distribution of soil data at national and regional scales. While still under evaluation, this approach holds potential for improving comparability across SMSs, aligning with the SML's requirements, and accommodating local specificities.

Data accessibility remains a significant challenge, with limited consensus on standards for ensuring interoperability and broad availability. This issue is compounded by the fact that much of the data is georeferenced and, in several countries, classified as personal data subject to GDPR constraints (Fantappiè et al., 2021; Cornu et al., 2023). However, such restrictions could be avoided by aggregating and disseminating data at the soil unit level (e.g., using mean values), ensuring both privacy and accessibility.

CONCLUSION

This study highlights the significant variability in the design and implementation of Soil Monitoring Systems (SMSs) across European Member States. While this diversity reflects national priorities, environmental conditions, and resource constraints, it also poses challenges for harmonizing soil monitoring efforts and addressing the requirements of the upcoming Soil Monitoring Law (SML). Key discrepancies were identified in the sampling design, monitored

parameters, all of which undermine the comparability of results and the ability to monitor soil health effectively at the EU level.

Despite these challenges, opportunities for harmonization exist. The LUCAS Soil campaign offers a valuable reference point for inter-comparisons and the development of transfer functions to address methodological differences among SMSs. Complementary strategies, such as adding monitoring points to address gaps in spatial coverage, integrating scoring systems for soil health evaluation, and developing transfer functions to reconcile methodological differences, offer practical pathways to address the SML's objectives while considering national contexts. Nevertheless, as the LUCAS system itself does not fully meet the SML requirements, it will need to evolve to be used by Member States to report on soil health. In conclusion, harmonizing SMSs in line with the SML demands a balance between unifying standards and respecting existing systems.

This study focuses on SMSs primarily targeting agricultural soils. However, some countries host additional monitoring networks dedicated to other soil-related processes. Including these systems as well as systems from EU Member States outside the EJP SOIL program, will enhance the complexity of harmonizing existing data to meet the requirements of the SML framework. Additionally, although this study evaluates several key soil parameters monitored by SMSs, it does not cover certain aspects explicitly recommended by the SML, such as soil erosion and soil sealing. These soil threats are crucial for meeting the comprehensive objectives set by the SML. Future research should assess the capacity of existing SMSs to monitor these processes.

3.3. Bilan des 20 premières années des productions scientifiques du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS)

Mason, E., Chavrit, D., Héliès, F., Jolivet, C., Arrouays, D., & Bispo, A. (2023). Bilan des 20 premières années des productions scientifiques du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), Étude et Gestion des Sols, 30, 307-322. {hal-04548899}

Article publié en Français dans Etude et Gestion des Sols
Soumis en décembre 2022, accepté en mai 2023

RESUME

Le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) est un programme d'échantillonnage et d'analyse de sols français en place depuis 2000, constitué de 2240 sites. Une nouvelle campagne d'échantillonnage est prévue tous les quinze ans afin de suivre l'évolution de la qualité des sols. La première campagne et la moitié de la deuxième campagne, actuellement en cours, ont permis la collecte et le stockage de 36000 échantillons. L'évaluation et le suivi de la qualité des sols sont fondés sur l'analyse des propriétés physico-chimiques et biologiques de ces échantillons en lien avec la description des sols, de leur environnement et la connaissance de l'historique de l'occupation ainsi que des pratiques de gestion de chaque site. Ces étapes d'observation, d'analyse et de collecte d'information sur les sols sont des préalables à de nombreux travaux de recherche visant à qualifier l'état des sols, puis à renseigner sur leur évolution. Notre étude a pour objectif de déterminer qui utilise les données et échantillons du RMQS et pour quels usages, principalement de recherche. Pour ce faire, à l'aide de bases de données bibliographiques, nous avons inventorié les publications scientifiques sur le RMQS ou utilisant des données et/ou des échantillons du RMQS. Nous avons considéré des articles de journaux scientifiques à comité de lecture et des ouvrages publiés en anglais et en français. Une analyse textuelle utilisant la plateforme numérique CorTexT a été effectuée pour obtenir une compréhension globale du contenu des 236 publications identifiées en date du 26 juillet 2022. L'analyse textuelle a révélé que le suivi de la qualité des sols, la teneur en éléments traces, l'abondance et la diversité des communautés microbiennes, la teneur en carbone et la stratégie d'échantillonnage sont, par ordre décroissant d'importance, les principaux thèmes abordés dans les publications. En ce qui concerne les acteurs, 72 % des principaux auteurs qui ont publié plus de 6 articles sont de INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement). Deux revues, « Étude et Gestion des Sols » et « Geoderma », ont publié près d'un tiers des articles identifiés. L'ouverture des données du réseau devrait permettre d'accroître encore le nombre et les sujets des publications, tout comme les équipes qui publient.

Mots-clés

Analyse de littérature ; Carbone organique ; CorTexT ; Ecologie microbienne ; Éléments traces métalliques ; Qualité des sols ; Réseau de mesures de la qualité des sols ; RMQS ; Stratégie d'échantillonnage.

INTRODUCTION

Les sols suscitent de plus en plus d'intérêt, de par leur implication dans de nombreux enjeux sociétaux tels que le changement climatique, la préservation de la biodiversité, la transition agroécologique ou encore la santé humaine (Veerman et al., 2020). Anticipant cette demande, le réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) a vu le jour en 2000 afin de connaître l'état des sols de France et d'être en mesure de suivre leur évolution à long terme (Arrouays et al., 2021). Ce programme du Groupement d'intérêt scientifique Sol (Gis Sol) est mis en œuvre par l'unité de service InfoSol du centre INRAE Val de Loire, devenue l'unité de recherche Info&Sols depuis janvier 2023. Le RMQS consiste en un réseau de 2 173 sites en France métropolitaine et 67 en Outre-Mer répartis de manière uniforme, chacun au centre d'une maille carrée de 16 km de côté (Jolivet et al., 2006, 2018). Afin de suivre l'évolution des propriétés des sols, chacun de ces sites est voué à être échantillonné et analysé de la même manière, au cours des campagnes successives d'échantillonnage. La première campagne (RMQS1) s'est déroulée de 2000 à 2009 en France métropolitaine. La deuxième campagne (RMQS2), en cours, a débuté en 2016 et devrait se terminer en 2027. Des prélèvements d'échantillons de sols à différentes profondeurs, des mesures et des observations sont effectués pour chaque site par des partenaires régionaux selon un protocole harmonisé (Jolivet et al., 2018).

Après le prélèvement d'un site, les échantillons sont envoyés au Conservatoire Européen des Échantillons de Sol (CEES, INRAE Val de Loire, site d'Orléans) pour y être préparés (Ratié et al., 2010). Ils sont ensuite analysés pour une large gamme de paramètres physico-chimiques et biologiques dans différents laboratoires. Après analyse, les échantillons sont conservés et stockés au CEES, pour être mis à disposition pour de futures études. Actuellement le CEES stocke 24 000 échantillons du RMQS1 et 12 000 échantillons du RMQS2. L'évaluation et le suivi de la qualité des sols dans le cadre du RMQS sont fondés sur la description des sols et de leur environnement, l'analyse de propriétés physico-chimiques (ex: pH, teneur en carbone organique, densité apparente, teneur en éléments grossiers, teneurs de divers éléments et contaminants) et biologiques des sols (ex : diversité des communautés bactériennes et fongiques, déterminée après extraction et séquençage de l'ADN), et la connaissance de l'historique de l'occupation et des pratiques de gestion de chaque site. La campagne RMQS1 représente ainsi 1 800 000 données collectées à travers tous types d'occupations de sols : grandes cultures, prairies permanentes, forêts, vignes, vergers, friches, milieux naturels, jardins.

Les données sont gérées au sein de la base de données DoneSol par l'unité INRAE InfoSol (Info&Sols depuis le 01/01/2023). Jusqu'à fin 2021, l'accès aux données se faisait après signature d'une licence de mise à disposition. Depuis décembre 2021, les données du RMQS1, à l'exception des coordonnées géographiques précises, sont en ligne et directement téléchargeables sur le portail data.inrae.fr. L'obtention des échantillons est quant à elle plus complexe car ces échantillons patrimoniaux sont précieux et en quantité limitée. Les demandes de mise à disposition des échantillons passent par une demande auprès du GIS Sol et nécessitent un accord d'utilisation des échantillons. La demande doit avoir une dimension d'intérêt national et correspondre à la charte élaborée par le GIS Sol. Après examen de la demande et délibération, le GIS Sol donne éventuellement son accord pour l'utilisation des échantillons.

L'observation, l'analyse, la collecte de données et d'information sur les sites du RMQS sont les premiers maillons de la recherche sur l'état des sols de France. La qualité du travail à chaque étape, depuis le prélèvement par les partenaires, jusqu'à la mise en base de données des informations et leur vérification, en passant par la préparation et l'analyse des échantillons, est nécessaire. Sans ce soin apporté par tous les acteurs du dispositif, il ne serait pas possible de réaliser des travaux de recherche sur la connaissance générale et l'évolution des sols de France.

L'objectif de cette étude est i) d'identifier les articles scientifiques portant sur le RMQS ou utilisant les données et échantillons du RMQS, ii) de caractériser leur diversité et les thèmes couverts et iii) de réaliser un bilan des auteurs et des revues dans lesquelles sont publiés les articles. Il s'agit également de mettre en évidence d'éventuelles évolutions depuis 20 ans.

METHODOLOGIE

Notre démarche s'est déroulée en deux étapes successives : 1) identification des publications scientifiques sur le RMQS ou qui utilisent des échantillons et/ou des données du RMQS par un processus de recherche bibliographique, en inventoriant toutes les publications existantes (en langue française ou anglaise), 2) analyse textuelle des publications et identification de sous-groupes thématiques.

Identification du corpus RMQS

Pour déterminer le corpus utilisé dans cette étude, une liste bibliographique de publications du RMQS a d'abord été créée avec le logiciel Zotero, nommée "bibliothèque RMQS", selon les modalités décrites ci-dessous. Cette bibliothèque est constituée de références de publications sur le RMQS, ou bien qui utilisent des échantillons et/ou des données du RMQS.

Dans un premier temps, les références contenues dans des fichiers préexistants (par exemple rapports, tableaux Excel) ont été exportées dans la bibliothèque RMQS Zotero. Ensuite, afin d'avoir la bibliothèque la plus exhaustive possible, des recherches ont été faites dans des bases de données bibliographiques en ligne pour compléter cette bibliothèque. Les références ont été d'abord recherchées dans Web of Science, Scopus, et la collection HAL INRAE InfoSol. Pour chacun de ces outils, les mots-clés suivants (en anglais et en français) ont été utilisés : "RMQS soil", « French soil monitoring network », « French soil quality monitoring network », "réseau de mesures de la qualité des sols". Ces termes ont été cherchés dans tous les champs de recherche proposés (titre, résumé, mots-clés). Certaines publications n'étaient pas trouvées par Scopus ou Web of Science. Des recherches avec Google Scholar ont permis de détecter certaines de ces publications manquantes mais ce moteur de recherche pouvant proposer un très grand nombre de références, nous nous sommes limités aux mots-clés suivants : "French soil monitoring network" et "French soil quality monitoring network". Avant l'ajout dans la bibliothèque RMQS Zotero, une vérification manuelle des publications issues de chaque résultat de recherche a été faite, afin d'écarter les publications n'ayant pas de lien avec le RMQS, ou qui font uniquement des citations du RMQS.

Chaque référence de publication vérifiée a ensuite été importée dans Zotero, automatiquement ou manuellement, et ajoutée à la bibliothèque RMQS Zotero. Les doublons ont également été supprimés. Au final, la bibliothèque RMQS Zotero contient ainsi 319 références en date du 26 juillet 2022. L'exactitude des champs de références a été vérifiée et éventuellement corrigée, notamment pour le champ "type de document", qui était parfois inexact lors de l'importation des références.

Les références de la bibliothèque ont ensuite été filtrées avec le champ "type de document", afin que la bibliothèque RMQS utilisée pour l'analyse textuelle ne soit constituée que de publications scientifiques et/ou techniques : articles de revues, livres et sections de livre (les types de documents tels que lettres, articles de colloques et rapports ont été écartés pour l'analyse textuelle), soit finalement 236 références (Figure 16). Les références de cette bibliothèque RMQS filtrée ont été uniformisées préalablement à l'analyse textuelle, en complétant les champs de références d'intérêt vides, tel que l'ajout du résumé dans le champ "résumé" et l'ajout de la langue de la publication dans le champ "langue". Pour les analyses textuelles de cette étude, le corpus est constitué des champs de références suivants : le résumé, le nom des auteurs, l'année de publication et la langue de la publication, pour chaque publication. Nous avons ainsi obtenu le corpus global constitué des 4 champs de référence (cités ci-dessus) de 236 publications.

Pour nous permettre de réaliser l'analyse textuelle, le corpus global a ensuite été scindé en deux, par langue (Figure 16). Une analyse textuelle a été faite du corpus composé des publications en français et une autre du corpus avec les publications en anglais.

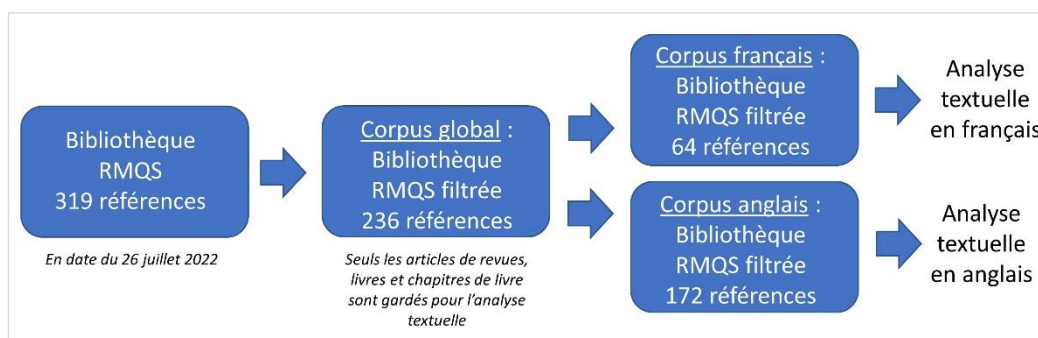


Figure 16 : Schéma indiquant les étapes nécessaires à la détermination des 3 corpus utilisés dans cette étude à partir de la bibliothèque RMQS.

Analyse textuelle du corpus par l'outil CorTextT

Le corpus obtenu a été analysé pour obtenir une compréhension globale de son contenu. Les champs de référence des articles utilisés pour l'analyse du corpus sont pour chaque article le résumé, les auteurs, l'année de publication et la langue de la publication. L'analyse textuelle permet d'effectuer un examen automatisé d'un corpus et offre un moyen d'explorer rapidement la littérature pour se faire une idée des thèmes abordés et des relations qui existent entre ces thèmes. Plusieurs études démontrent l'intérêt de l'analyse textuelle pour l'exploration d'un corpus (Reboud et al., 2012 ; Sandoval et Tarot, 2014 ; Tancoigne et al., 2014 ; Réchauchère et al., 2018). Nous avons appliqué cette approche au corpus RMQS identifié au moyen de la recherche bibliographique.

L'analyse textuelle se compose de deux étapes principales (El Akkari et al., 2018). La première étape a pour objectif d'identifier les mots ou groupes de mots (termes) les plus importants au sein des articles (titre et résumé) et de calculer leur fréquence dans le corpus global. Les mots sans signification spécifique (conjonctions de coordination, mots présents dans tous les articles scientifiques) sont éliminés. Les synonymes (mots ou termes) sont combinés, puis la liste des principaux termes trouvés (qui ont été combinés ou non) dans le corpus est élaborée.

La deuxième étape de l'analyse textuelle vise à calculer la fréquence à laquelle deux termes se retrouvent dans le même article. Des cartes, appelées « network mapping » ou « cartes de réseau », sont ensuite créées pour présenter les résultats sous une forme synthétique. Ces cartes fournissent une représentation visuelle des thèmes abordés dans le corpus. Ces « visualisations » permettent d'évaluer quels mots-clés apparaissent le plus fréquemment, et lesquels apparaissent le plus fréquemment ensemble, en les organisant en groupes de mots-clés apparentés, appelés clusters. L'analyse des termes et des relations entre les termes au sein d'un cluster permet d'identifier un thème spécifique à ce groupe d'articles. Les relations entre les clusters peuvent mettre en évidence la façon dont les différents thèmes présents dans le corpus sont liés entre eux.

Pour cette étude, nous avons utilisé le programme d'analyse textuelle CorTexT Manager¹. Cette plateforme numérique d'analyse textuelle a été développée par l'IFRIS (Institut Francilien Recherche, Innovation et Société). L'IFRIS est un consortium d'Unités de Recherche qui travaillent sur les questions liées aux interactions entre sciences, techniques et sociétés ainsi que politiques de recherche et d'innovation. CorTexT Manager permet de réaliser des revues de littérature à grande échelle et de corrélérer de grands volumes de données (Aviso et al., 2020 ; Ubando et al., 2021).

RESULTATS

Description du corpus

La revue exhaustive de la littérature s'est concentrée sur les articles de revues scientifiques, les livres et sections de livre de la bibliothèque RMQS Zotero en date du 26 juillet 2022, pour un total de 236 publications (Figure 16). Parmi celles-ci, 199 sont des articles de revues scientifiques publiés, 15 sont des livres et 22 sont des sections de livre.

Les publications identifiées datent toutes de 2001 à 2022 inclus (Figure 17). Un tiers de celles-ci (73/236, 31 %) datent des cinq dernières années, soit entre 2018 et 2022. Le nombre de publications a considérablement augmenté à partir de 2009, avec un volume annuel se situant entre 11 (2015) et 22 (2016) publications, à l'exception de l'année 2010 (7). Parmi les 236 publications, 73 % (172/236) sont en anglais et 27 % (64/236) en français. Jusqu'en 2009, plus de la moitié des publications étaient en français. Néanmoins l'apparition puis l'amplification des publications en langue anglaise se manifestent dès 2005.

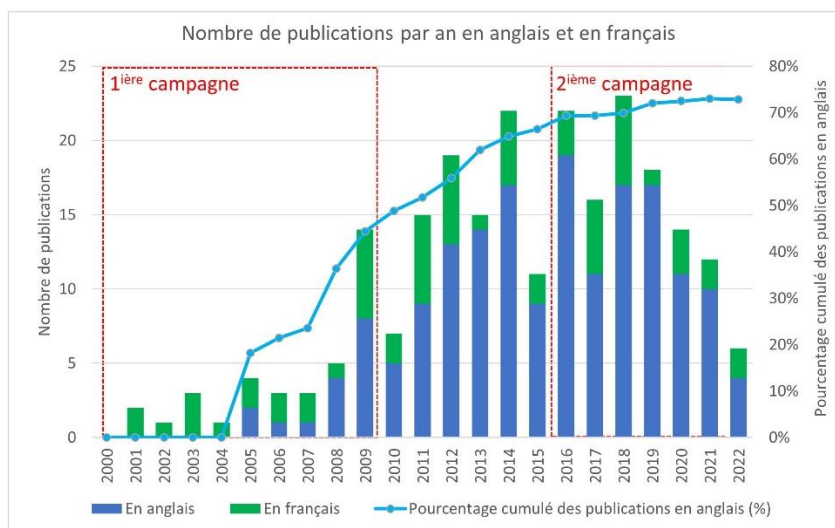


Figure 17 : Graphique représentant le nombre de publications par an par langue.

La baisse constatée depuis le pic de 2018 ne reflète pas une tendance durable. Notre corpus ne comprend que des articles publiés et référencés jusqu’à mi-2022 et ne reflète donc que très partiellement une année très productive. L’année 2023 en cours s’annonce aussi particulièrement riche, du fait de nouvelles analyses et de l’implication du RMQS et d’Info&Sols dans de nouveaux et nombreux programmes nationaux et européens.

Orientation thématique des corpus

Orientation thématique du corpus en français

CorTexT a produit la liste des principaux termes employés dans les résumés et titres des 64 publications en français du corpus français. Les termes les plus utilisés sont par ordre décroissant « mesure de la qualité », « carbone organique », « éléments traces métalliques », « stratégie d’échantillonnage » et « communautés microbiennes » (Tableau 7). In fine, 31 % des publications du corpus en français contiennent le terme “mesure de la qualité”.

Tableau 7 : Nombre de publications qui contiennent les principaux termes utilisés dans le corpus en français (64 publications).

Principaux termes utilisés	Publications qui contiennent ces termes (en nombre)	Publications qui contiennent ces termes (en %)
Mesure de la qualité	20	31 %
Carbone organique	7	11 %
Éléments traces métalliques	6	9 %
Stratégie d’échantillonnage	6	9 %
Communautés microbiennes	6	9 %

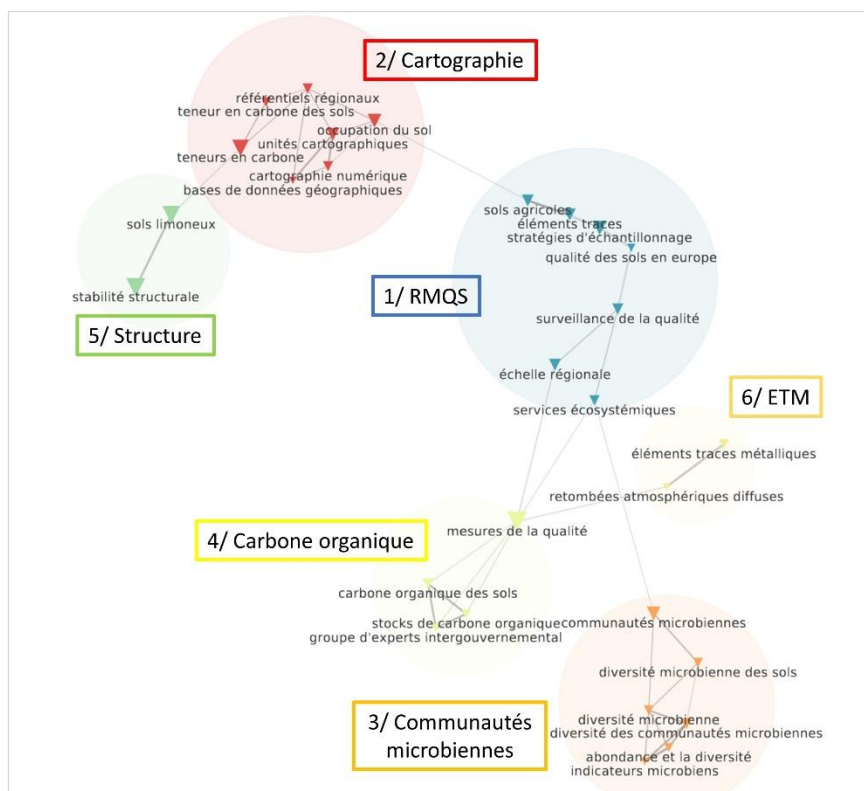


Figure 18 : Carte de réseau du corpus des 64 articles publiés en français.

Sous forme visuelle, une carte de réseau montre les interconnexions entre les principaux termes extraits, représentés par des nœuds, par le biais de liens. La carte de réseau élaborée pour le corpus examiné est présentée dans la Figure 18. Les termes les plus utilisés correspondent aux nœuds les plus grands. Plus les nœuds se retrouvent placés près les uns des autres sur la carte, plus la fréquence à laquelle deux termes se retrouvent dans le même article est élevée. Ces caractéristiques ont conduit à l'identification de 6 clusters thématiques, qui sont regroupés par le logiciel au sein de cercles de couleur sur la carte. Chaque cluster comporte ainsi plusieurs termes, représentant un thème pour lesquels nous avons proposé des noms (encadrés sur la Figure 18). Les 6 clusters sont les suivants :

Le **cluster 1**, intitulé “RMQS” et représenté par le cercle bleu, est lié aux clusters 2, 3 et 4. Le cluster comprend les termes clés « stratégies d'échantillonnage », « échelle régionale », « sols agricoles », « qualité des sols ». Il représente la description générale du Réseau de mesures de la qualité des sols qui est reprise dans diverses publications.

Le **cluster 2**, intitulé “Cartographie” et représenté par le cercle rouge, est étroitement lié aux clusters 1 et 5. Parmi les termes notables inclus dans ce cluster figurent « base de données géographiques », « unités cartographiques », « occupation du sol », « cartographie numérique » et « référentiels régionaux ». Ces termes correspondent à la description de la méthodologie de cartographie utilisant les données du RMQS qui est présentée dans certaines publications.

Le **cluster 3**, intitulé “Communautés microbiennes”, représenté par le cercle orange est lié au cluster 1. Il comprend des termes tels que « communautés microbiennes », « abondance et diversité » et « indicateurs microbiens ». Une proportion significative des publications du corpus étudie les communautés microbiennes des sols des sites RMQS.

Le **cluster 4**, intitulé “Carbone organique” et représenté par le cercle jaune, est lié aux clusters 1 et 6. Il comporte les termes « mesures de la qualité », « carbone organique des sols », « stocks de carbone organique » et « groupe d'experts intergouvernemental ». Ce groupe fait

référence à la mesure et l'évaluation des stocks de carbone des sols en France ainsi qu'à leur évolution en lien avec les enjeux climatiques.

Le **cluster 5**, intitulé "Structure" et représenté par le cercle vert, est lié seulement au cluster 2. Il comprend les termes « stabilité structurale » et « sols limoneux » et intègre des publications du corpus liées à la structure des sols des sites RMQS et à la surveillance du tassement.

Le **cluster 6**, intitulé "ETM" et représenté par le cercle orange, est lié seulement au cluster 4. Il contient les termes « éléments traces métalliques » et « retombées atmosphériques diffuses ». Une proportion des publications du corpus étudie la contamination des sols par les éléments traces métalliques.

Tableau 8 : Nombre de publications qui contiennent les principaux termes utilisés dans le corpus en anglais (172 publications).

Principaux termes utilisés	Publications qui contiennent ces termes (<i>en nombre</i>)	Publications qui contiennent ces termes (<i>en %</i>)
Soil mapping	20	12 %
Soil quality monitoring organique	19	11 %
Organic matter	14	8 %
Trace elements	12	7 %
Soil bacteria	11	6 %

Orientation thématique du corpus en anglais

CorTexT a produit la liste des principaux termes employés dans le corpus des publications en anglais, constitué de 172 publications. Les termes les plus utilisés sont par ordre décroissant « soil mapping », « soil quality monitoring », « organic matter », « trace elements » et « soil bacteria » (Tableau 8). 12 % des publications du corpus en anglais contiennent le terme "soil mapping". La carte de réseau a permis d'identifier 6 clusters thématiques (Figure 19). Les 6 clusters identifiés sont les suivants :

Le **cluster 1**, intitulé "Suivi de qualité" et représenté par le cercle orange, est étroitement lié aux clusters 2, 4 et 6. Il comprend les termes clés « quality monitoring network », « soil bacterial », « soil pH », « trace elements ». Il représente la description générale du Réseau de mesures de la qualité des sols et intègre l'évaluation et le suivi de la qualité des sols fondés sur l'analyse de propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

Le **cluster 2**, intitulé "Données" et représenté par le cercle bleu, est étroitement lié au cluster 1. Parmi les termes notables inclus dans ce cluster figurent « digital soil », « soil data », « soil mapping », « soil classification » et « C stocks ». Ces termes correspondent à l'étude de la distribution des sols en France et de leurs propriétés.

Le **cluster 3**, intitulé "Teneur en carbone" et représenté par le cercle rouge est lié au cluster 4. Le cluster comprend les termes « carbon concentrations », « mir spectra », « carbon content ». Il intègre des publications spécifiques à l'évaluation du stock de carbone organique et inorganique dans les sols, notamment avec des approches de spectrométrie infra-rouge.

Les **clusters 4**, intitulé "Communautés microbiennes", **et 5**, intitulé "Diversité microbienne", sont représentés respectivement par les cercles vert et jaune. Ils peuvent être regroupés en un seul cluster : "propriétés microbiennes". Le cluster 4 est en lien avec les clusters 1 et 3. Les clusters comprennent des termes tels que "microbial communities", "soil dna", "soil microbial diversity" et "molecular microbial biomass". Ce groupe fait référence à l'étude des communautés microbiennes des sols des sites RMQS.

Le **cluster 6**, intitulé “Type de sols” et représenté par le cercle jaune orangé, est lié aux clusters 1 et 4. Il contient les termes “soil organic matter”, “regional scale”, “calcareous soils” et “arable soils”.

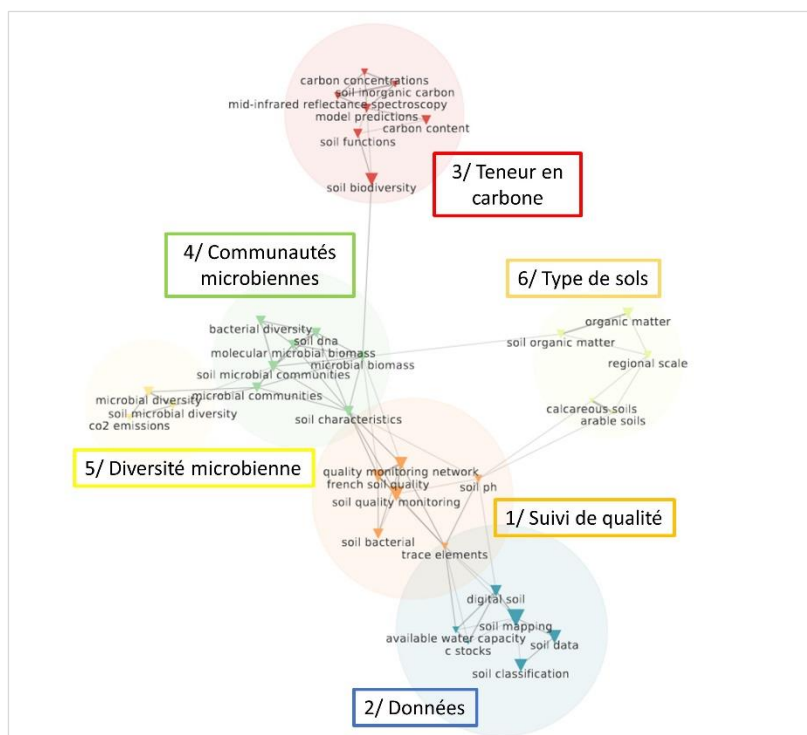


Figure 19 : Carte de réseau du corpus des 172 articles publiés en anglais.

Principaux auteurs des publications

Parmi les plus de 800 auteurs des 236 publications en anglais et français constituant notre corpus global (Figure 16), 60 ont publié plus de 6 articles chacun. Un peu moins des trois quarts des auteurs en ayant publié plus de 6 chacun (43/60, 72 %) appartiennent à INRAE (Institut national de recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement), toutes unités confondues. Les principaux auteurs INRAE sont issus majoritairement de l’unité de service InfoSol (21 auteurs) et de l’UMR Agroécologie (12). Ces unités font toutes partie du Département AgroEcoSystem d’INRAE. Les autres auteurs hors INRAE ayant plus de 6 publications proviennent de diverses universités françaises (6), d’AgroCampus Ouest (2), de l’IRD (2), d’universités britanniques (2), etc. Ces 60 principaux auteurs sont tous des chercheurs en science du sol.

La Figure 20 représente les interconnectivités entre les principaux auteurs. Ceux-ci sont répartis en 5 clusters. Au sein d’un même cluster, sont identifiés tous les co-auteurs qui publient en général sur une même thématique (ex : en jaune, les communautés microbiennes) avec des liens vers d’autres clusters et notamment le cluster central, représenté principalement par les personnels de l’unité InfoSol.

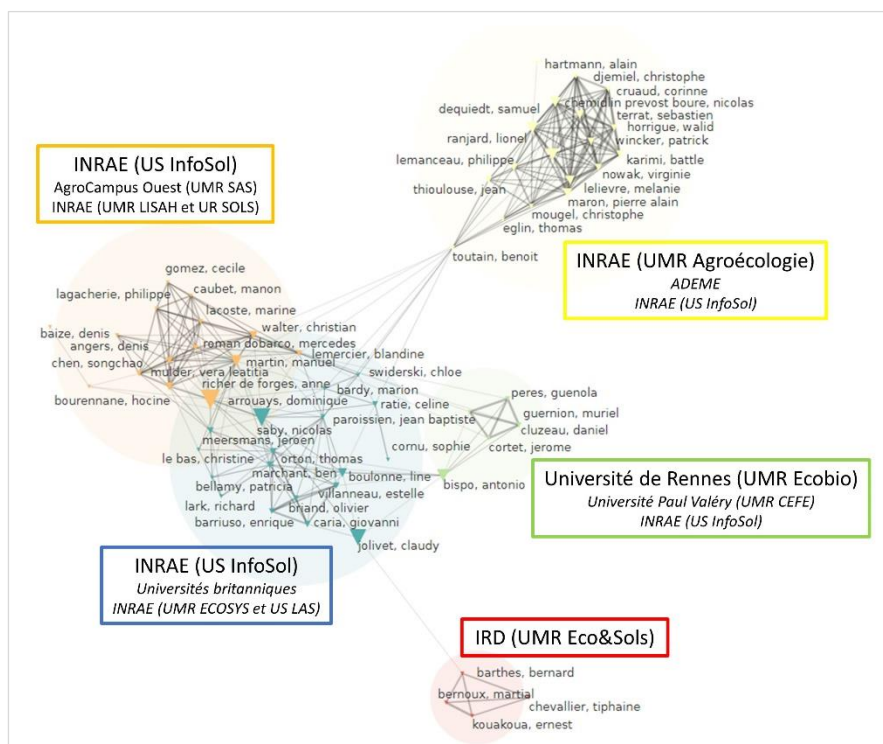


Figure 20 : Carte représentant les interconnectivités entre les 60 principaux auteurs. En gras est indiqué pour chaque cluster l'organisation à laquelle appartient la majorité des auteurs du cluster et en italique les autres organisations du cluster où travaillent seulement un ou deux auteurs du cluster.

Parmi les 236 publications du corpus, 199 sont des articles de revues scientifiques qui ont été publiés dans 70 revues. Les 6 principales revues sont présentées dans le Tableau 9, avec le nombre total d'articles et le facteur d'impact de la revue à deux ans (2021-2022). Six revues ont publié 51 % (101/199) des articles scientifiques constituant le corpus (Tableau 9). La revue *Étude et Gestion des Sols* (EGS) a été la plus productive avec 34 articles (17 %), suivie de *Geoderma* (#33, 17 %), *Science of The Total Environment* (#14, 7 %), *Soil Use and Management* (#8, 4 %), *Innovations Agronomiques* (#6, 3 %) et *Plos One* (#6, 3 %). Parmi les 3 principales revues, *Geoderma* et *Science of The Total Environment*, deux revues de l'éditeur Elsevier, publient en anglais. Elles ont respectivement un facteur d'impact de 6,114 et de 7,963, des valeurs considérées comme élevées dans leur domaine. À noter que le tableau ne reflète que très partiellement le niveau d'impact des publications car certains articles sont parus dans des revues qui ne figurent pas parmi les principaux supports mais dont le facteur d'impact est considéré comme « exceptionnel », comme par exemple *Global Change Biology*, *Nature Communications* ou *Science Advances* (avec des facteurs d'impact supérieurs à 13). Inversement, on note une assez forte proportion d'articles en français dans des revues « open-access » (EGS, *Innovations Agronomiques*) destinées à un public francophone. Notons, au passage, que le présent article, ainsi que tous ceux qui seront publiés dans le numéro spécial d'EGS dédié aux « 20 ans du RMQS », contribueront à cette volonté de transfert.

S'agissant des citations, le nombre cumulé de citations de ces 199 articles est de 11 579. 61 articles, soit 31 % des articles, ont été cités plus de 50 fois chacun (Tableau 10). Un article faisant référence au RMQS a été cité plus de 1 400 fois (Minasny et al., 2017).

Tableau 9 : Principales revues dans lesquelles publient les auteurs et Facteurs d'Impact associés.

Nom revue	Editeur revue	Langue revue	Facteur d'impact (2021-2022)	Nombre publications corpus
Etude et Gestion des Sols	AFES (Association Française de l'Etude des Sols)	Français	/	34
Geoderma	Elsevier	Anglais	6,114	33
Science of The Total Environment	Elsevier	Anglais	7,963	14
Soil Use and Management	BSSS (British society of soil science)	Anglais	2,95	8
Innovations Agronomiques	INRAE	Français	/	6
Plos One	Public Library of Science	Anglais	3,240	6

Tableau 10 : Classement des articles selon le nombre de fois qu'ils ont été cités.

Articles cités	Nombres d'articles
Entre 0 et 9 fois	49
Entre 10 et 49 fois	89
Entre 50 et 99 fois	30
Entre 100 et 199 fois	22
Entre 200 et 499 fois	8
Plus de 500 fois	1

DISCUSSION

Analyse de l'évolution du nombre d'articles du corpus

À partir de 2009, le nombre total de publications a considérablement augmenté. La première campagne s'étant terminée en 2009, en France métropolitaine, c'est à partir de cette date que les données ont commencé à être analysées et étudiées à l'échelle du territoire.

Depuis 2009, le nombre annuel de publications en anglais est supérieur au nombre annuel de publications en français. Avant 2009, les publications décrivaient principalement la stratégie et la méthodologie d'échantillonnage du RMQS ainsi que sa mise en place. Les publications s'adressaient donc plutôt à un public français. Toutefois, certains résultats intermédiaires étaient déjà publiés en anglais. À partir de 2009, les premiers résultats complets de la première campagne sur des paramètres spécifiques ont été disponibles et publiés en anglais dans des journaux à portée internationale.

Il est également à noter qu'aucun article entièrement dédié à la description du RMQS n'a été publié en anglais. C'est une limite à la diffusion du dispositif de suivi de la qualité des sols dans les pays non francophones. En effet, certains pays pourraient bénéficier de l'exemple français qu'est le RMQS afin de mettre en place un tel réseau de suivi ou bien afin d'adapter ou moderniser leur propre réseau dans leur pays. Il est à noter, toutefois, que beaucoup de publications anglaises décrivent sommairement le principe du RMQS et/ou insistent sur ses avantages. Le dispositif a aussi été présenté de très nombreuses fois dans des conférences

internationales et décrit dans des rapports européens. Le RMQS est donc internationalement reconnu et, bien qu'il ne soit entièrement détaillé dans aucune publication dédiée dans un journal scientifique en anglais, ses éléments fondateurs et principales caractéristiques sont connus au plan international. Pour pallier cela, le manuel du RMQS vient récemment d'être traduit en anglais et publié. Ceci va permettre une diffusion internationale des protocoles utilisés dans le RMQS (Jolivet et al., 2022).

Analyse de l'orientation thématique des publications et des auteurs

Les 5 principaux termes utilisés dans le corpus français et anglais sont très similaires (Figure 21). On retrouve la notion de « mesure de la qualité » au niveau des deux corpus, de même pour les notions de « carbone organique », « éléments traces » et « communautés microbiennes ». À noter que « communauté microbienne » est un terme bien plus large que « soil bacteria » ; en effet, dans le corpus en anglais, il s'agit principalement de bactéries, alors qu'en français, le terme microbien est plus inclusif (bactéries, champignons, voire archées). Le terme « stratégie d'échantillonnage » apparaît plus fréquemment dans le corpus français qu'anglais. On peut émettre l'hypothèse que la stratégie d'échantillonnage est davantage développée dans le corpus français les premières années du réseau pour le présenter alors que les publications du corpus en anglais s'orientent davantage autour de la gestion et du suivi des données déjà acquises (« soil mapping »). Il est toutefois probable que les problématiques d'échantillonnage reviennent à l'avenir au premier plan, en particulier dans le cadre d'harmonisations européennes ou mondiales (Bispo et al., 2021 ; Bispo et al., 2022 ; Maréchal et al., 2022).

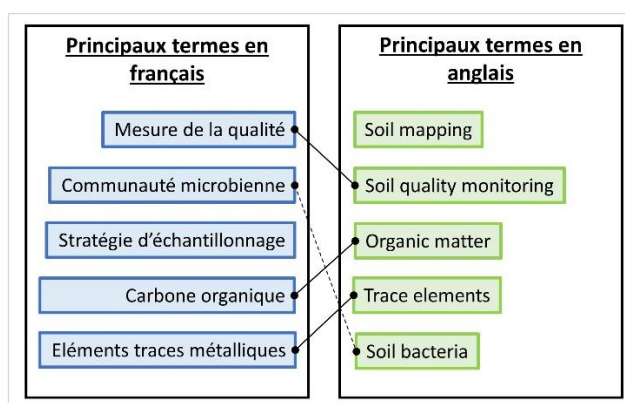


Figure 21 : Schéma représentant les principaux termes utilisés dans les corpus anglais et français.

Axée sur la contamination des sols, la première campagne RMQS a permis de cartographier les teneurs en 10 éléments traces métalliques (cadmium, cobalt, chrome, cuivre, molybdène, nickel, plomb, thallium, mercure et zinc). D'autres contaminants minéraux non métalliques (arsenic) et organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB), pesticides, dioxines et furanes) ont été également analysés. Les termes utilisés dans le corpus relatifs aux contaminants minéraux et organiques n'apparaissent pas sur les cartes de réseaux (Figures 18 et 19). Ces cartes des réseaux affichent seulement les 35 principaux termes pour des raisons de lisibilité. Il convient de noter que plusieurs termes relatifs aux contaminants minéraux et organiques font partie des 100 principaux termes utilisés dans les corpus anglais et français comme les termes « HAP » et « pesticide ».

Soixante-douze pourcents des principaux auteurs qui ont publié plus de 6 articles sont INRAE. Parmi ces auteurs, 49 % font partie de l'Unité de Service (US) InfoSol et 28 % de l'UMR Agroécologie, deux unités pilotes dans l'acquisition des données, la gestion des échantillons et des bases de données.

L'unité InfoSol assurant la coordination globale et le suivi du programme RMQS, il n'est pas surprenant qu'elle publie ou soit associée à de nombreuses publications. Ainsi, par exemple, les 14 premiers articles, publiés entre 2001 et 2008, proviennent tous de scientifiques de l'unité InfoSol et décrivent la mise en place du RMQS ainsi que les premiers résultats. Les travaux de l'UMR Agroécologie arrivent plus tard, lorsque l'ensemble des échantillons et la méthodologie sont disponibles pour l'étude, à l'aide d'approches moléculaires à haut débit, des communautés microbiennes des sols et des interactions biotiques soutenant de grandes fonctions écosystémiques remplies par les sols. Les principaux termes utilisés extraits des corpus anglais et français liés à la thématique « communautés microbiennes » proviennent d'articles publiés par ce collectif de scientifiques INRAE.

Vingt-huit pourcents des principaux auteurs sont des scientifiques hors INRAE (IRD, Université de Rennes, AgroCampus Ouest devenu désormais l'Institut Agro, etc.). Les données du RMQS ne sont ainsi pas seulement utilisées par des scientifiques INRAE. Il est également à noter que les données étant désormais accessibles à un public plus large, sur le portail data.inrae.fr, le pourcentage d'auteurs hors INRAE devrait de ce fait augmenter au cours des prochaines années. Les cartes de prédictions issues du programme RMQS sont également en ligne sur l'infrastructure de données géographiques INRAE (agroenvgeo.data.inrae.fr). D'autre part, les données du RMQS et leurs résultats n'alimentent pas que la recherche, elles sont très largement utilisées par les politiques publiques, et font aussi l'objet de diffusion via le web et sous formes d'atlas et de rapports accessibles au grand public.

On notera enfin le souci constant de valoriser en parallèle les résultats issus du RMQS dans des revues internationales de haut niveau, y compris des revues généralistes, mais également dans des revues francophones à vocation de transfert. Ceci correspond pleinement aux missions que le GIS Sol a assignées au RMQS. Ceci démontre également la volonté d'une valorisation à tous les niveaux, non exclusivement réservée au cercle des scientifiques ayant accès aux revues internationales le plus souvent payantes. Un travail de croisement avec d'autres sources de données (LUCAS Soil, SoilGrids) a déjà été effectué. Il est intéressant de constater que le « mélange de ces données » apporte en général une amélioration des prédictions car leurs échelles d'acquisition ne capturent pas exactement les mêmes facteurs de contrôle de la distribution des paramètres des sols (Román Dobarco et al., 2017 ; Caubet et al., 2019). Une analyse plus fouillée et systématique de la comparaison, des apports respectifs, de la complémentarité et de la faisabilité d'utiliser simultanément des réseaux nationaux et européens est en cours dans le cadre du programme Européen EJP Soil (Styc et al., 2023).

Des avancées scientifiques permises par le RMQS

Le RMQS a permis de grandes avancées scientifiques majeures que l'on peut tenter de classer en quelques grandes catégories. Ainsi on peut distinguer celles liées :

1) aux avancées en termes de méthodologies de prédiction, telles que la méthode MIRS-NIRS (Grinand et al., 2012) et le séquençage ADN (Ranjard et al., 2013) ;

2) aux avancées sur la caractérisation des propriétés des sols et de leurs déterminants majeurs, telles que les ETM (Saby et al., 2011), les contaminants organiques et phytosanitaires (Villanneau et al., 2011 ; Orton et al., 2013 ; Froger et al., 2021), le carbone organique (Martin et al., 2011, 2014 ; Meersmans et al., 2012 ; Mulder et al., 2016), le carbone inorganique (Marchant et al., 2015), le phosphore total (Delmas et al., 2015), la biogéographie des communautés microbiennes (Ranjard et al., 2013 ; Karimi et al., 2018, 2019, 2020b) ;

3) aux avancées méthodologiques concernant le traitement spatial ou statistique des données, telles que les analyses multivariées sous contraintes spatiales (Saby et al., 2008 ; Arrouays et al., 2011), les géostatistiques robustes (Marchant et al., 2010, 2015 ; Saby et al., 2011 ; Lacarce et al., 2012), les méthodes statistiques originales et innovantes (Marchant et al., 2011 ; Orton et al., 2012 ; Froger et al., 2021), les modèles de mélanges de cartes (Roman Dobarco et al., 2017 ; Caubet et al., 2019 ; Chen et al., 2020), les stratégies d'échantillonnages et statistiques globales (Brus et Saby, 2016).

Des travaux de recherche conduits à diverses échelles

De nombreux travaux de recherche ont été conduits à l'échelle du RMQS complet (ou du moins dans sa dimension métropolitaine), voire en combinant ce jeu de données avec d'autres (DoneSol, LUCAS Soil, SoilGrids, BioSoil). D'autres travaux ont porté sur des sous-échantillons pour des raisons diverses. Une première raison a souvent été le coût de la mise en œuvre des analyses sur l'ensemble du territoire, comme par exemple pour la glomaline (Staunton et al., 2020), le lindane (Villanneau et al., 2009), la biodiversité en Bretagne (Cluzeau et al., 2012), le carbone extractible à l'eau chaude en Bourgogne (Guigue et al., 2015). Les sous-ensembles choisis ont alors permis une étude de « démonstration » de faisabilité qui s'est ensuite parfois étendue au territoire. Un des enjeux principaux lors de la mise en place de ce type de travail est d'optimiser le jeu d'échantillonnage dans l'espace des variables, des co-variables, ou dans l'espace géographique. Une deuxième raison a été que, parfois, un sous-ensemble relativement bien couvert a permis une première étude permettant de prouver la faisabilité du RMQS ou encore sa potentialité à détecter des gradients contrastés. Des exemples types sont la publication de Saby et al. (2006) sur l'étendue de la contamination métallique en région parisienne ou celle de Villanneau et al. (2009) sur le lindane dans le Nord de la France. Une troisième raison réside dans le fait que certaines régions ont pu trouver les moyens de réaliser des analyses complémentaires, comme par exemple pour le « black-carbon » en région Centre (Paroissien et al., 2012). Enfin une dernière raison est d'ordre méthodologique. Le couplage de BioSoil et du RMQS a fourni par exemple un « modèle naturel » de la mise en place simultanée de deux réseaux ayant des stratégies d'échantillonnage vertical et des protocoles analytiques différents (Louis et al., 2014). Certaines études se sont aussi focalisées sur une occupation donnée des sols (Jalabert et al., 2010 ; Chen et al., 2019). Dans le même ordre d'idée, le test de certaines fonctions/méthodes de pédotransfert a pu se réaliser sur une partie du réseau (Martin et al., 2009) ce qui pose la question du domaine de validité de ces prédictions (Chen et al., 2018). L'enjeu de couvrir ce domaine de validité est également présent

dans les stratégies de sous-échantillonnages dont les prélèvements ont un coût prohibitif, comme par exemple pour la mesure du réservoir utilisable pour les plantes (Swiderski et al., 2017). Dans l'ensemble, on peut noter que les échantillonnages outre-mer ont pour l'instant été assez peu valorisés. L'une des raisons est certainement le faible nombre de points sur les îles relativement petites ou sur la Guyane où le RMQS s'est concentré sur la bande côtière pour des raisons logistiques.

Les limites de CorText et de l'analyse textuelle en général

L'analyse CorText repose sur la base de données bibliographique identifiée. La méthode de recherche utilisée présente d'abord des limites liées au contenu des bases utilisées. En effet, si elle a permis de collecter en grande majorité des articles scientifiques dans des revues à comité de lecture à l'aide des bases de données bibliographiques Scopus et Web Of Science, elle ne prend pas en compte les valorisations non académiques, peu représentées dans cet inventaire d'articles. Ainsi, des documents non publiés dans des revues à comité de lecture, tels que ceux à vocation de support aux politiques publiques, ont très certainement été omis. De même, toutes les valorisations académiques non systématiquement indexées (présentations dans des conférences internationales, des workshops, etc.) échappent à l'analyse. Enfin, certains articles utilisant les données mais ne citant pas explicitement le RMQS ont très probablement échappé à notre recherche.

Par ailleurs, CorText présente aussi un certain nombre de limites. Les cartes de réseau varient selon que le nombre d'articles d'un corpus soit grand ou petit, ce qui a un impact partiel sur la robustesse des résultats. De plus, les cartes de réseau issues de CorText ne documentent que la fréquence à laquelle deux termes se retrouvent dans le même article, sans attribuer la signification d'un cluster à une thématique. Le choix d'une dénomination donnée d'un cluster est fait « à la main » par un expert, en fonction de ses propres connaissances (soit « à dire d'expert »). Le rôle des experts dans la phase de dénomination d'un cluster introduit un élément subjectif qui doit être reconnu.

CONCLUSION

Depuis la mise en place du réseau en 2000, les données issues du RMQS ont servi de base aux scientifiques, principalement INRAE, pour de nombreuses publications étudiant des thématiques variées. L'analyse textuelle a révélé que le suivi de la qualité des sols, des teneurs en éléments traces, de l'abondance et de la diversité microbienne, de la teneur en carbone et la stratégie d'échantillonnage sont par ordre décroissant d'importance les principaux thèmes abordés dans les publications. Au fil du temps, selon l'avancée des campagnes du RMQS, un changement dans les sujets de recherche est observé.

Les résultats de la première campagne RMQS1 ont permis d'établir l'état de référence d'un grand nombre de propriétés des sols : évaluation de la fertilité chimique (pH, teneurs en phosphore, azote, oligo-éléments, etc.), nouvelle estimation des stocks de carbone de surface

des sols, première cartographie de la biomasse microbienne des sols français. Axée sur la contamination des sols, la première campagne RMQS a également permis de cartographier les teneurs en 10 éléments traces métalliques et d'en comprendre la répartition. D'autres contaminants minéraux et organiques ont été également analysés. Les résultats de notre analyse du corpus abondent dans ce sens. Les publications entre 2001 et 2016 portent principalement sur la mise en place et la stratégie du RMQS ainsi que sur la contamination des sols. Toutefois, de nouvelles problématiques environnementales émergent (e.g., perturbateurs endocriniens, pathogènes, micro-plastiques) qui ouvrent la voie à de nouvelles déterminations. De même, les progrès de la technologie, permettent, et permettront de plus en plus, des analyses à haut débit de nombreux paramètres du sol. En ce sens, les échantillons sauvegardés au CEES peuvent être considérés comme un véritable trésor potentiel pour la recherche et pour la « mémoire » de l'évolution des propriétés des sols de France.

Pour la nouvelle campagne, RMQS2, les analyses physico-chimiques et biologiques de la campagne RMQS1 sont reconduites afin de mesurer l'évolution des propriétés des sols entre les deux campagnes. De nouveaux paramètres ont également été ajoutés afin de mieux évaluer la sensibilité des sols en contexte de changement climatique (réserve utile, matières organiques particulaires, stock de carbone profond). Cette préoccupation liée au climat se reflète dans l'étude du corpus, où de nombreuses publications depuis 2017 se consacrent à l'évaluation des stocks de carbone organique des sols et à leur potentiel de stockage additionnel. Les premières données d'analyses de la deuxième campagne commencent à être disponibles et de nouvelles études en cours se focalisent sur la comparaison des données du RMQS1 et du RMQS2 afin de commencer dès à présent à évaluer l'évolution de la qualité des sols entre ces 2 campagnes.

Des perspectives d'adosser au RMQS un programme de phyto-pharmaco-vigilance dans les sols (concernant les pesticides actuels) et un réseau de surveillance de la biodiversité du sol (faune, flore, micro-organismes bactériens et fongiques) sont également à l'étude. Les problématiques de l'harmonisation et de la complémentarité entre réseaux nationaux et réseaux européens ouvrent également de nouvelles voies de recherche méthodologiques.

L'ensemble des publications déjà produites, et le potentiel de celles à venir, montrent ainsi clairement que le « pari » du RMQS et l'ensemble des investissements financiers et humains qui y ont été consacrés ont déjà fait la démonstration de leur utilité scientifique. Sans abandonner - bien au contraire - la valorisation scientifique du programme, il reste encore à améliorer sa visibilité et sa stratégie de diffusion. Ces points devraient logiquement continuer à voir s'accroître le rayonnement, l'impact et l'attractivité du RMQS dans la communauté scientifique et bien au-delà. On peut logiquement penser que plus les échantillons et les sites du RMQS seront caractérisés et suivis dans le temps, plus leurs valeurs patrimoniales, scientifiques, politiques, médiatiques et sociétales prendront de l'importance.

3.4. Scientific indicators and stakeholders' perceptions on soil threats in France: how do they compare?

Mason, E., Cornu, S., Froger, C., Saby, N.P.A, & Chenu, C. (2024). Scientific indicators and stakeholders' perceptions on soil threats in France: how do they compare? Article soumis pour publication.

European Journal of Soil Science
Article soumis le 26 juin 2024

L'article a été rédigé dans le cadre du programme EJP SOIL, et plus précisément dans le WP7 (Synthèse et intégration des connaissances) (**Annexe E**, Figure 1A).

ABSTRACT

Soils are under multiple threats at a global scale, with varying levels of intensity and nature in different regions. It is therefore important to assess soil threats at local level using specific indicators. Scientific indicators have been developed to accurately assess soil health, yet they can be challenging to implement at local scale. As some stakeholders have good knowledge of soil conditions, the objective of this paper is to determine whether stakeholders' perceptions on soil threats can be used as a complementary indicator. The study focuses on five soil threats: erosion, artificialisation, compaction, soil organic carbon (SOC) loss, and contamination. It is based on 1,951 responses from a participatory stakeholder consultation conducted in France in 2021. We explored stakeholders' prioritisation of soil threats and elaborated perception maps at the departmental scale. We then compared stakeholders' perception maps with scientific indicator maps per soil threats at the departmental scale. Our findings indicate that stakeholders consider artificialisation as the most important soil threat in France. The spatial distribution of soil threats based on stakeholders' perceptions and scientific indicators matches in 43% of the departments for SOC loss, and in over half of the departments for erosion (50%), compaction (51%), artificialisation (63%), and contamination (74%). However, disparities remain in certain departments and depending on the threat. These disparities can be explained by biases in the indicators used (scientific assessment or stakeholders' perception) or in the comparison. It can be concluded that, when these biases are taken into consideration, stakeholders' perceptions can be used as an indicator for soil threats and can supplement existing scientific indicators.

Keywords

EJPSOIL; Multi-actor consultation; Soil challenge; Soil degradation; Soil health; Stakeholder perspective

INTRODUCTION

Life on Earth depends on healthy soils. Soil provides a number of essential services, including provisioning (food, feed and fibre), regulating (air quality and water purification), supporting (soil formation and nutrient cycling) and cultural services (recreation and aesthetic value) (Dominati et al., 2014). However, soils are threatened globally because of (i) a higher demand for food, feed and fibre which leads to an increasing pressure on soil and land resources (Popp et al., 2014), and (ii) an increase of soil and land degradation caused amongst others by unsustainable management practices in agriculture and forestry, contamination, and artificialisation through urbanization and infrastructures (Veerman et al., 2020). Worldwide, at least one third of the soils are considered as moderately to heavily degraded (FAO & ITPS, 2015). In Europe, the EUSO soil health dashboard (JRC, 2023) indicates that more than 60% of European soils are considered degraded. Eight threats are sources of harm or degradation to the soil, reducing its quality and productivity: erosion, artificialisation, compaction, soil organic carbon (SOC) loss, contamination, salinisation, desertification, and declines in soil biodiversity (Kibblewhite, 2012). Soil threats vary between countries and regions across Europe due to, among others, distinct land use and farming systems (Hessel et al., 2022), soil types and environmental zones in Europe. For instance, a stakeholder consultation in 20 countries of the EJP Soil consortium showed that while the major concern for Western, Northern and Central Europe was “improving SOM & peat soil conservation”, in Southern Europe “improving water storage capacity” was recognized as the main soil concern (Vanino et al., 2023). Therefore, increased attention to the context-specificity is needed. Soil threats should be assessed at local scale with dedicated indicators.

Faber et al. (2022) defined indicators as “single or multiple parameters that are quantifiable using analytical protocols, or modelled integrated ‘scores’ based on interaction of such parameters, which are responsive to change in management and external drivers of soil quality”. Indicators are crucial to monitor soil conditions within time. This explains why indicators are a key element in the recent European Commission published proposal for a ‘Directive of Soil Monitoring and Resilience’ (European Commission, 2023). Numerous reviews and inventories of internationally and nationally developed soil indicators (Faber et al., 2022; Huber et al., 2008; Montanarella et al., 2018; Panagos et al., 2020; Tóth et al., 2008) were conducted in order to provide the European Commission with scientific-technical support for various policy processes, including zero pollution, chemicals, circular economy, urban development, climate resilience, ecosystem health, biodiversity, water and food security. However, for certain soil threats, the connection between soil condition and an indicator is not yet fully established, either due to a lack of consensus on definitions of indicators, methods of analysis and sampling and threshold values, or because the necessary soil data is unavailable or too complex for regional or national assessments (European Environmental Agency, 2023). Involving local and regional stakeholders’ knowledge could supplement the development of effective and reliable scientific indicators. Indeed, some stakeholders have good knowledge of soil conditions at the scale they are working (Mason et al., 2023a). This raises the following questions: could we use stakeholders’ perception as an indicator? Is stakeholders’ perception complementary to existing scientific indicators? There are a few studies in the literature comparing stakeholders’ perceptions and scientific indicators. Nord & Snapp (2020) highlighted that farmers’ perceptions of changes in soil fertility status were aligned with measured soil properties.

Similarly, Hijbeek et al. (2017) found a correlation between the scientific indicator and farmers' perceptions of soil organic matter deficiency. Conversely, other studies found that farmers' perceptions of soil fertility do not always match scientific indicators (Kelly & Anderson, 2016; Shukla & Arora, 2023).

To address these questions, a participatory stakeholder consultation was conducted in France, involving public authorities, non-governmental organisations (NGOs), researchers, farmers, advisors and agricultural schools. France presents a large variety of pedoclimatic conditions, covering seven distinct environmental zones (Metzger et al., 2005), which allows for a spatial comparative analysis of stakeholders' perceptions and scientific indicators on soil threats. We focused on five specific soil threats for which scientific indicators maps were available at the national scale, i.e. erosion, artificialisation, compaction, SOC loss, and contamination. The overall aim of this work is to investigate whether stakeholders' perceptions on soil threats can complement existing scientific indicators. We explored stakeholders' prioritisation on soil threats and developed stakeholders' perception maps at the departmental scale. Subsequently, maps of scientific indicators for each soil threat were examined at the departmental scale. Finally, we compared stakeholders' perceptions with scientific indicators per soil threat at the departmental scale.

MATERIAL AND METHODS

Stakeholders' perception

Questionnaire design and dissemination

A participatory stakeholder consultation was conducted in mainland France (Mason et al., 2023a). The targeted stakeholders included farmers, public authorities, scientific researchers, NGOs, advisors, and agricultural schools, working at different scales, from national to departmental and local scales. The questionnaire (**Annex C**) was designed to collect stakeholders' perceptions on soil threats in mainland France. Stakeholders were invited to respond to a series of multiple-choice questions. The questionnaire, in French, started with a series of questions designed to define the profile of the respondents (stakeholder's category; age; department; education level; at what scale they were working; land-use considered). Secondly, the stakeholders were asked to identify the soil threats they encountered most frequently at the scale they were working (farm, municipality, department, national), namely erosion, artificialisation, compaction, loss of soil organic carbon (SOC), and contamination. Respondents could select multiple soil threats or indicate "none of these five threats". The questionnaire was first tested on a sample of various stakeholders (5) and was adjusted in accordance to feedback. The questionnaire was completed in approximately 15 minutes. The study was conducted between December 2020 and September 2021 using an online survey tool and was disseminated through various channels (networks, direct contact, advisors for farmers, etc.).

Identity of the respondents

A total of 2,200 individuals participated in the survey. During data preparation, cases where respondents had answered less than 50% of the questions were excluded. Only respondents part of our list of targeted stakeholders were included. This resulted in a total of 1,951 cases for analysis, including 720 responses from farmers (37%), 383 from advisors (20%), and 352 from public authorities (18%). Other stakeholders, including agricultural schools (10%, 206), researchers (10%, 198) and NGOs (5%, 92) were less represented. Further details on respondent characteristics and representativeness can be found in Mason et al. (2023a). While the analysis of the 1,951 responses provided a national vision, to study the spatial variability of stakeholders' perceptions of soil threats in France, we needed to focus on responses from stakeholders who indicated working at local scale, namely the farm, municipality or department scale. This left us with 1,444 stakeholders: farmers (710), advisors (277), public authorities (305), agricultural schools (113), and NGOs (39). Researchers were excluded from the local scale analysis due to their limited representation at this scale. Of the stakeholders working at a local level, 95% were working with agricultural soils.

In order to ensure representativeness at local scale, we focused our investigation on departments that had received at least eight responses from stakeholders. This criterion resulted in the inclusion of 76 departments out of the 94 departments in mainland France, excluding Corsica (Figure 22). In some departments, a total of 44 responses were obtained. All included departments received responses from farmers, with the number of farmer respondents per department ranging from 1 to 30.

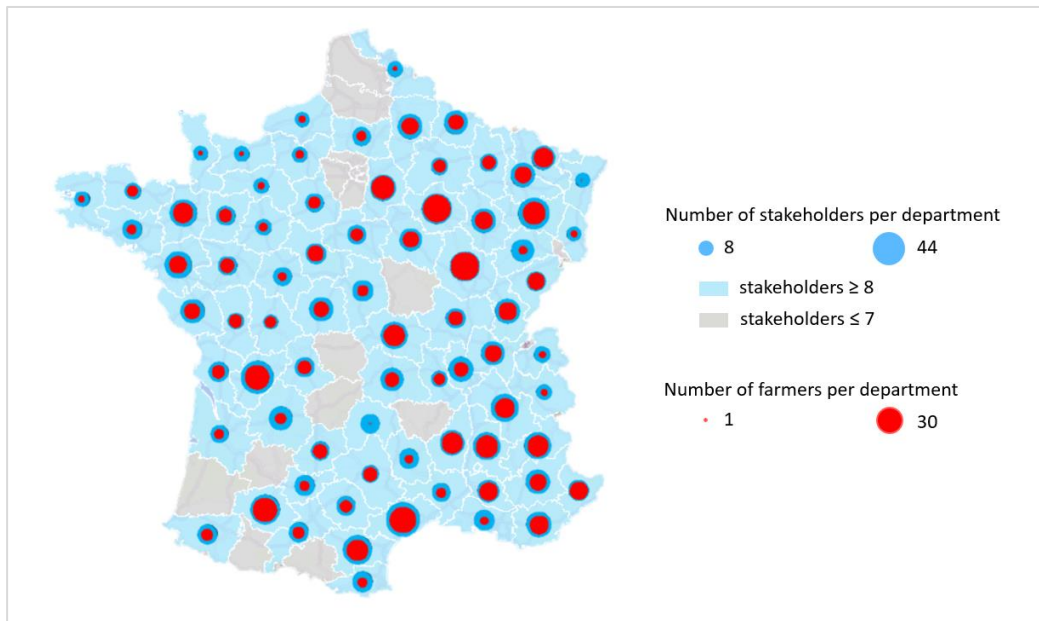


Figure 22: Number of stakeholders and farmers working at local scale, per department.

Data treatment

The data on stakeholders' perceptions was divided into three equal groups, or tertiles. The middle third includes the national mean percentage of stakeholders who perceive a given threat as important. Consequently, the lower and upper thirds of the dataset correspond to a lower and higher perception of the threat than the national mean. Data compilation and calculation of

descriptive statistics, including percentage distribution across multiple variables, were performed in Microsoft Excel.

Scientific indicators

The five considered threats were assessed using scientific indicators at the departmental scale for mainland France (Table 11). Based on available data at that scale, we reduced soil erosion to diffuse erosion by water, represented by the susceptibility to threshing and erodibility (le Bissonnais et al., 2002). Additionally, soil contamination focused on the elements copper (Cu), zinc (Zn), lead (Pb), cadmium (Cd), and 15 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). For Cu, Zn, Pb, Cd, an enrichment factor (EF) was calculated for the 0-30 cm soil layer in comparison to the 30-50 cm soil layer, in accordance with the methodology proposed by Austruy et al. (2016). For PAHs, the indicator was expressed as concentration classes. The two indicators were then combined into a single indicator. Compaction was assimilated to the risk caused by agricultural machinery on maize, and estimated by calculating the percentage of years in which severe compaction could occur during the maize harvest (Lefèvre, 2010). Lastly, soil artificialisation was estimated by the percentage of total land area consumed between 2009 and 2021 (Cerema, 2022). SOC loss was estimated by comparing the concentration of SOC between 2000-2004 and 2005-2009 in the topsoil (Saby, 2019). As these diverse soil threat indicators were initially assessed at a finer grain than that of the department (municipality, small agricultural region, or sites on a systematic 16km x 16km grid), a preliminary treatment step consisted in aggregating these estimates at the departmental scale using different approaches (e.g. sum, median, or spatially weighted median) depending on the indicator considered.

The results of the soil threat indicators were grouped into intensity classes. For artificialisation, the classes were grouped using an agglomerative hierarchical cluster analysis (AHC) with the XLSTAT software (Addinsoft, 2016). For SOC loss, three classes of the variation in the change of SOC concentration between 2000-2004 and 2005-2009 were considered: a positive change considered as no decrease, a negative change lower than 9.9% considered as not a significant decrease, and a negative change larger than 10% considered as a significant decrease. For contamination, three classes of median enrichment factors for Cu, Cd, Zn, and Pb, as well as three classes of median PAH concentrations, were considered (the two highest classes reported in Table 11 were merged). The two indicators were then combined, with the highest contamination class among the four ETMs and PAHs being assigned.

Comparison method

Stakeholder perception maps and scientific indicator maps were generated using Microsoft 3D Maps in Excel 2016 (Microsoft, 2018). When comparing the scientific indicator data with stakeholders' perception data (from those working at local scale), four distinct situations were encountered for the different departments: (i) stakeholders' perception was lower than the scientific indicators; (ii) stakeholders' perception was higher than the scientific indicators; (iii) stakeholders' perception matched the scientific indicators, that is to say, (iiia) the threat was both perceived and assessed, or (iiib) the threat was neither perceived nor assessed.

RESULTS

Stakeholders' perception

French stakeholders' perception of global soil threats at the national scale

Globally, at the national scale (1,951 respondents), the results show that artificialisation was perceived as an important soil threat by 44% of respondents, followed by SOC loss (30%), erosion (28%), and compaction (26%). Contamination was considered the least significant soil threat, with only 18% of respondents identifying it as important. Additionally, “none of these five threats” was also reported by 19% of all respondents.

The perceived importance of these threats varied according to the stakeholder category (Figure 23). Farmers identified artificialisation as an important threat (38%), while only 2% reported encountering contamination on their farms. 43% of farmers stated that none of these five soil threats was an issue on their farms. It should be noted that there were no differences in responses among farmers with different agriculture types (organic farming, conventional farming and conservation agriculture). Advisors considered compaction, artificialisation and SOC loss as important threats, with only 12% of them considering contamination to be an important soil threat. Researchers, public authorities, NGOs, and agricultural schools all shared the same point of view, identifying artificialisation, erosion, SOC loss, and contamination as equally important threats.

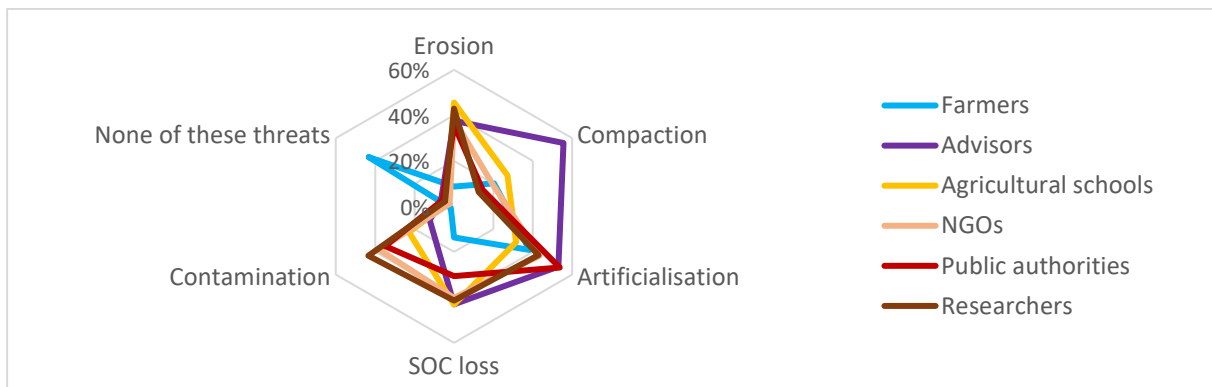


Figure 23: Proportion of the various stakeholder categories that consider the different soil threats as important at their working scale, considering all scales from local to national.

Spatial variability of the stakeholders' perception

The perception of stakeholders working at local scale (1,444 responses) also varied per soil threat, as shown in Figure 24 and Table 12. In two-thirds of the departments, 18% (the maximal value within the lower third) to 60% (the maximal value) of stakeholders considered contamination an important threat, whereas 57% to 83% of stakeholders considered artificialisation an important threat. The distribution for the remaining three threats is comparable: in two-thirds of the departments, erosion, compaction, and SOC loss are considered important threats by about 30% to over 60% of stakeholders.

Table 11: Overview of scientific indicators used to map the different soil threats.

Threat	Erosion	Artificialisation	Compaction	SOC loss	Contamination
Definition used	Diffuse water erosion hazard.	Conversion of natural, agricultural or forest areas into urbanised areas.	Compaction risk caused by agricultural machinery on maize.	Change in organic carbon concentrations in the topsoil.	Diffuse contamination of Cu, Zn, Pb, Cd, and PAHs.
Indicator	Spatial assessment of soil erosion hazard (MESALES model) combining: several properties of the soil, the terrain and the climate (le Bissonnais et al., 2002).	% of total land area consumed between 2009 and 2021.	% of years in which severe compaction could occur during the maize harvest, calculated over a 30-year period.	Change in SOC concentrations between 2000-2004 and 2005-2009.	Enrichment factor (EF) in the 0-30 cm soil layer compared to the 30-50 cm soil layer for Cu, Zn, Pb, Cd ¹ , and concentration for PAHs.
Threshold	5 classes representing the probability of erosion occurring.	Agglomerative hierarchical cluster analysis.	4 classes representing the probability of risk.	3 classes representing the level of change in SOC concentration.	3 classes of EF are considered: <2; 2-5; 5-20 (Austruy et al., 2016) and 4 classes of PAHs concentration: <200; 200-600; 600-1000 and > 1000 µg kg ⁻¹ (CCME, 2010).
Source of data	GIS SOL (2011)	Cerema (2022)	GIS SOL (n.d.) and Lefèbvre (2010)	BDAT (n.d.) and Saby (2019)	RMQS (n.d) and Saby et al. (2023)
Data grain	Small agricultural region	Municipality	Municipality	Small agricultural region	Systematic sampling 16km x 16 km grid (approximatively 2,100 sites)
Method of aggregation	Spatially weighted median	Sum	Spatially weighted median	Median	Median

¹ $EF = \frac{ET_{0-30cm}/Al_{0-30cm}}{ET_{30-50cm}/Al_{30-50cm}}$ with ET the concentration of Cu, Zn, Cd or Pb, and Al the concentration of Al in the corresponding soil layer (0-30 cm or 30-50 cm), after Austruy et al. (2016).

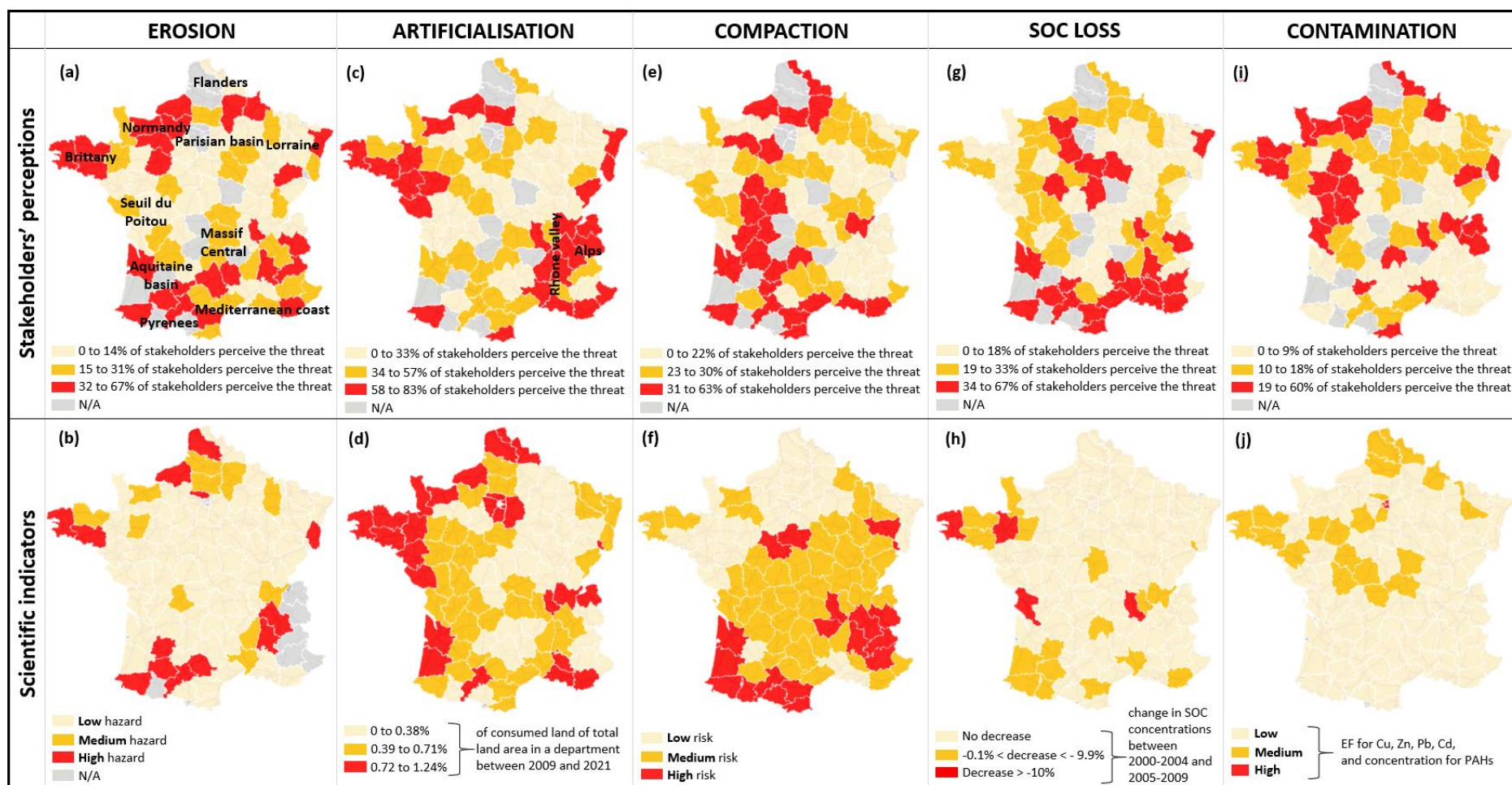


Figure 24: Maps representing per department the percentage of stakeholders perceiving a soil threat as important (upper row) and the scientific indicators for the different soil threats (lower row). The threats are: (a and b) erosion, (c and d) artificialisation, (e and f) compaction, (g and h) SOC loss, and (i and j) contamination. For stakeholders' perception, the results are presented in thirds: yellow, orange and red for the lower, middle, and upper thirds of the dataset, respectively. The level of threat assessed by scientific indicators is represented on maps using the same colour code: yellow for low, orange for medium, and red for high.

Table 12: Distribution of the percentages, per department, of stakeholders - working at local scale - perceiving a given threat as important (n = 1,444).

	Erosion	Artificialisation	Compaction	Loss of SOC	Contamination
Minimum	0%	0%	0%	0%	0%
Maximum	67%	83%	63%	67%	60%
Mean	24%	45%	27%	26%	15%
Lower third (max.)	14%	33%	22%	18%	9%
Middle third (max.)	31%	57%	30%	33%	18%

Comparison between scientific indicators and stakeholders' perceptions

Both scientific indicators and stakeholders' perceptions, reported at the departmental scale, demonstrate spatial variation over mainland France for all the considered soil threats (Figure 24). A comparison of the two types of information shows the following:

(i) for erosion (Figure 24a and b), stakeholders' perception matched the scientific indicator in half of the departments (50%). In 32% of the departments, the threat was neither perceived nor assessed (mainly in Lorraine, the southern part of the Parisian basin, and Seuil du Poitou). In contrast, the threat was both perceived and assessed in 18% of the departments (mainly in Brittany, the south of the Aquitaine basin, the central part of the Rhône valley, and the north of the Parisian basin). In the remaining half of the departments, stakeholders' perception was either lower than the scientific indicators (10% of the departments) or higher (40% of the departments). Higher perception was mainly observed along the Mediterranean coast, the Massif Central, the Aquitaine basin, and the south of Normandy.

(ii) for artificialisation (Figure 24c and d), stakeholders' perception matched the scientific indicator in 63% of the departments. The threat was both perceived and assessed in 43% of the departments, including the Mediterranean coast, the Rhône valley, Brittany, the north of the Seuil du Poitou, and the northern Alps. In 20% of the departments, the threat was neither perceived nor assessed, with the majority of these departments located in the east of the Parisian basin. However, stakeholders' perception was lower than the scientific indicators in 25% of the departments, mainly in the north of the Aquitaine basin, and higher in 12% of the departments.

(iii) for compaction (Figure 24e and f), stakeholders' perception matched the scientific indicator in 51% of the departments. The threat was both perceived and assessed in 41% of the departments, including the Pyrenees and the Aquitaine basin. In 10% of the departments, the threat was neither perceived nor assessed, predominantly in the north of the Seuil du Poitou. However, in 32% of the departments, stakeholders' perception was lower than the scientific indicators, mainly in Lorraine and the Rhone valley. In 17% of the departments, stakeholders' perception was higher than the scientific indicators.

(iv) for SOC loss (Figure 24g and h), between the periods 2000-2004 and 2005-2009, SOC concentration decreased in 22% of departments in France, particularly in Brittany, the south of the Aquitaine basin, and the north of the Rhône valley. Stakeholders' perception did not match the scientific indicators in 57% of the departments. Indeed, stakeholders' perception was lower than the scientific indicators in 4% of the departments and higher in 53% of the departments. This latter situation was predominantly observed in the western, southern, and northern parts of the Parisian basin, the east of the Seuil du Poitou, the Rhône valley, parts of the Alps, and along the Mediterranean coast. However, the threat was both perceived and assessed in 13% of the departments, while in 30% of the departments, the threat was neither perceived nor assessed (mainly in some departments in central and north-west France).

(v) for contamination (Figure 24i and j), only 26% of the departments (24/94) had medium to high enrichment factors (EF) for Cd, Cu, Pb, Zn and PAH concentrations. Contamination in mainland France is primarily located in the northern half of the country, including the Paris suburb, Brittany, the south-west of the Parisian basin, and Flanders. The contamination in the Paris suburb is due to industrial and urban activities, while the contamination in Brittany and Flanders is likely of agricultural and industrial origin, respectively. Stakeholders' perception matched the scientific indicator in 74% of the departments. The threat was neither perceived nor assessed in 60% of the departments (e.g. in the eastern part of the Parisian basin and the Rhône valley). The threat was however both perceived and assessed in 14% of the departments (e.g. in Brittany and north-eastern France). In addition, stakeholders' perception was lower than the scientific indicators in 4% of the departments and higher in 22% of the departments, particularly in the north of the Alps and Normandy.

The spatial distributions of soil threats, as perceived by stakeholders, matched the scientific indicators to varying degrees depending on the threat. The matches between stakeholders' perceptions and scientific indicators ranged from 43% for SOC loss to 74% for contamination. Stakeholders' perception of contamination was generally low and rarely assessed as high by scientific indicators across France. For erosion, compaction, and artificialisation, the matches were 50%, 51%, and 63%, respectively. The disparities can be attributed to a higher stakeholders' perception than the scientific indicators for erosion, SOC loss and contamination. Conversely, in the case of artificialisation and compaction, disparities can be attributed to a lower stakeholders' perception than the scientific indicators.

DISCUSSION

Main soil threats according to stakeholders' perception

In our study, stakeholders identified artificialisation as the most important soil threat in France. This is not unexpected, given that the rate of soil artificialisation in France (5.6%) is slightly higher than the European average (4.4%; EUROSTAT, 2018). Worldwide, artificialisation/soil sealing is ranked as the eighth most important threat by stakeholders (Arrouays & Dawson, 2022), and as the sixth for temperate soils (Esparza Robles, 2021). Arrouays & Dawson (2022) highlighted that artificialisation/soil sealing is predominantly perceived in countries with high population density. This explains why, in France, artificialisation was ranked as a more important threat than worldwide (in 2023, the worldwide population density was 54 inhabitants km⁻², compared to 118 inhabitants km⁻² in France). Conversely, Esparza Robles (2021) and Arrouays & Dawson (2022) ranked SOC loss as the main soil threat perceived by stakeholders for temperate soils and worldwide, respectively. These studies predominantly involved researchers as stakeholders, which may explain the difference in results with the present study. Indeed, when considering only researchers, SOC loss is perceived as a more important threat than artificialisation. Erosion and compaction were also ranked as important threats in France by stakeholders, whereas contamination was considered the least insignificant threat among those considered. Similar trends were found in Vanino et al. (2023) in Western European countries (including France).

When considering scientific indicators, a review by Montanarella et al. (2016) identified soil sealing as the main soil threat across Europe, with SOC loss ranked fourth. The same study ranked soil salinisation as the second main threat and contamination as the third. Právělie et al. (2024) revealed that soil contamination via pesticides had the largest spatial footprint at continental level in Europe of all the processes analysed. This suggests that the perception of contamination by stakeholders may be an underestimate, as it was ranked last among those considered in our study. It is worth noting that the perception of these threats can vary significantly across different regions of Europe. For instance, soil salinisation is more prevalent in Southern Europe, while industrial contamination is a major concern in Eastern Europe. Consequently, stakeholders in different regions may perceive these threats differently. It is also important to note that salinisation, as well as soil biodiversity loss and desertification, were not included in our study, which focuses on only five of the eight soil threats identified in Europe by Kibblewhite (2012).

Both scientific indicators and stakeholder's perceptions are biased

Despite an overall consistency between scientific indicators and stakeholders' perceptions, spatial disparities are observed in at least a fourth of the departments (up to half of them). These disparities can be explained by biases in the indicators (scientific assessment or stakeholders' perception) or in the comparison between them.

Biases in scientific indicators

The scientific indicators used in this study for each soil threat were either selected from existing scientific studies at the national scale for France (erosion, compaction, SOC loss) or established in our study based on existing data (artificialisation, contamination). However, these scientific indicators have their own limitations. As mentioned in the materials and methods section, the selected indicators only represent a part of the soil threat for erosion, contamination and compaction. We discuss below the implications of these choices:

(i) the scientific indicator for contamination focused on diffuse contamination of only Cu, Zn, Pb, Cd, and PAHs, and on 2,100 sites, as these contaminants are difficult and costly to measure. Furthermore, the list of contaminants is constantly evolving, thereby adding another layer of complexity to the process. Other soil contaminants such as mercury (Hg), arsenic (As), halogenated hydrocarbons, pesticides, and microplastics, which are described as important in the literature (Aqeel et al., 2014; Kedzierski et al., 2023; Sun et al., 2023), were not included in this study. For example, Froger et al. (2023) monitored 111 pesticide residues in 47 soils sampled across France, thereby highlighting the need to integrate pesticide residues in soil monitoring at national scale.

(ii) soil erosion is a complex process induced by (i) water as interrill erosion or rill and gully, (ii) tillage, (iii) wind, and (iv) crop harvesting (Borrelli et al., 2023). The model used by le Bissonnais et al. (2002), MESALES, considers only erosion by water that cannot infiltrate into the soil and runs off the soil surface downslope. Thus, it only represents a part of the erosion process. In addition, it provides a probability of occurrence of erosion, rather than a soil loss.

(iii) a first limitation of the scientific indicator used for soil compaction is that it has never been validated with measured data. Based on Lefèvre's thesis (2010), the indicator estimates the risk of compaction as the percentage of years in which severe compaction could occur

during maize harvests due to agricultural machinery, calculated over a 30-year period. The use of heavy agricultural machinery is one of the main causes of soil compaction on agricultural land (Bilotta et al., 2007). However, soil compaction can also occur as a result of other factors: trampling by grazing animals in pastures (Drewry et al., 2008) and in recreation land use, harvesting and machinery in forest and on construction sites (Batey, 2009). These processes are not represented in the model used. It is also important to note that maize, while a common crop, is not representative of all agricultural crops. Crops such as potatoes require more machine input per hectare and are therefore more likely to compact soils (Stoessel et al., 2018). Moreover, when comparing the scientific indicator map used for compaction (Figure 24f) with the map from the EUSO soil health dashboard (Houšková & Montanarella, 2008; JRC, 2023), notable differences emerge. According to the EUSO soil health dashboard, high risk of compaction is mainly found in the Seuil du Poitou and on the Mediterranean coast. In contrast, our scientific indicators suggest these areas have a low risk of compaction. This discrepancy underscores the critical importance of indicator selection.

Biases of perception

Stakeholders' perceptions of soil threats are influenced by psychological, socio-economic and cultural processes, including individual and collective cognitive processes (Marcon et al., 2015; Sullivan-Wiley & Short Gianotti, 2017), which can explain the disparities between stakeholders' perceptions and scientific indicators observed in our study:

(i) collective cognitive processes may induce a potential perception bias in erosion estimation along the Mediterranean coast and in most of Normandy, where stakeholders perceived the threat erosion to be higher than assessed by scientific indicators (Figure 24a and b). These areas are in the collective imaginary known to be vulnerable to erosion, which suggests that respondents may have overestimated erosion in these departments. Indeed, the correlation between threat perception and direct personal experience has been shown to be positive (Sullivan-Wiley & Short Gianotti, 2017). Van der Linden (2014) also observed a relationship between past experience and risk perception. Past negative experiences can influence stakeholders' perception of the probability and severity of future threats (Tasantab et al., 2022). Conversely, a lack of knowledge on threats may be responsible for the 43% of farmers who have not encountered any of the five soil threats on their farms. These farmers may consider other threats to be more significant, such as environmental, economic or other soil-related threats. In addition, other collective cognitive processes also influence stakeholders' threat perception, including media coverage and the legislative context. The information disseminated by both specialized and general media can significantly shape public perception (Paek & Hove, 2024). For example, alarmist discourses on SOC loss have heightened awareness and concern about this issue, as it has been widely communicated in the media. Furthermore, the legislative context at the time of the survey in 2021, particularly the enactment of the "Climate and Resilience" law, which includes provisions on achieving zero net land take, likely influenced stakeholders' perceptions and priorities. This legislative emphasis underscored threats related to soil sealing and land use changes.

(ii) the perception of threats varies according to their nature. Visible threats, such as erosion, artificialisation, and compaction, are easier for stakeholders to perceive. However, chemical exposure, being less apparent, is more challenging to detect, which may result in farmers not fully perceiving this threat.

(iii) the perception of threats also varies according to the category of stakeholder considered (Figure 23). For example, 56% of advisors perceived compaction as an important threat, in comparison to 13% to 27% for other categories of stakeholders. Similarly, contamination was mentioned as an important threat by researchers (43%), NGOs (38%), and public authorities (35%), whereas only 2% of farmers reported encountering contamination on their farm. This discrepancy may be explained by the differing sources of contamination that each group focuses on: researchers and public authorities may be more concerned with industrial and urban contamination, while farmers may primarily consider contamination related to agricultural practices. Since the distribution of stakeholders varies from one department to another (Figure 22), it is possible that the overall results may be influenced. To test this hypothesis, we considered the proportion of (i) farmers, (ii) advisors and (iii) agricultural schools (AS), NGOs, public authorities (PA) in departments where compaction or contamination is perceived, ranging from not important (department from the lower third) to important (department from the upper third) (Figure 25a and b). The results indicate that, for compaction, advisors are significantly located more in departments from the upper third than the lower third. Similarly, for contamination, farmers are significantly located more in departments from the lower and middle thirds, whereas agricultural schools, NGOs and public authorities are significantly located more in departments from the upper third. Therefore, the results are influenced by the variation in proportions of the different stakeholder categories among departments. However, the type of agriculture practiced by farmers (organic farming, conventional farming and conservation agriculture) did not have an influence on their perception of threats.

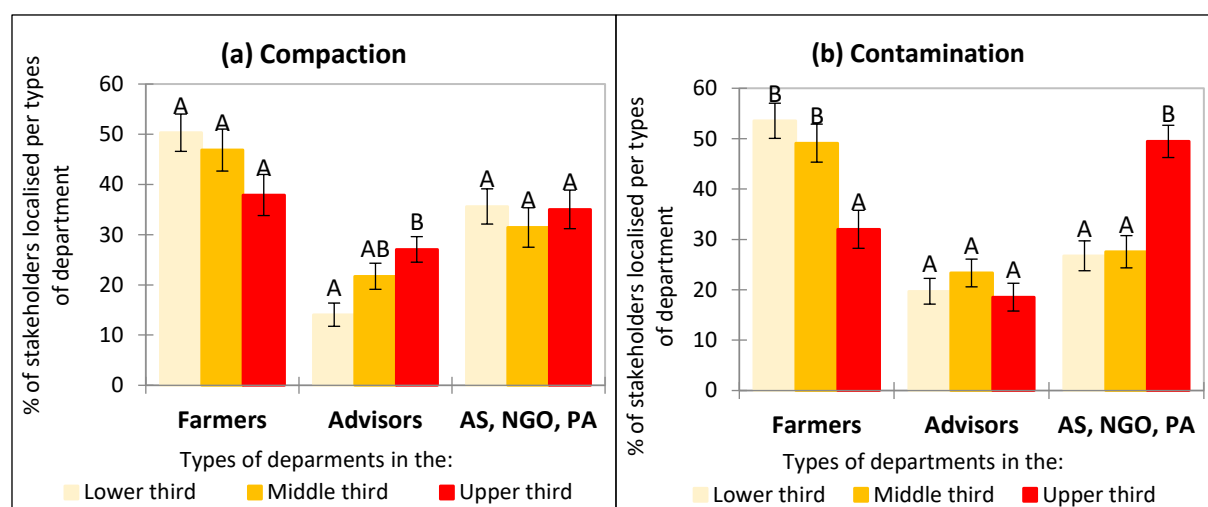


Figure 25: Proportion of different stakeholder categories in departments where compaction (a) or contamination (b) is perceived, ranging from not important (lower third) to important (upper third). The letters A and B represent the results of an ANOVA at a confidence level of 5%.

Comparison bias

Scientific indicators and stakeholders do not always have the same vision of soil threats

Certain scientific indicators only partially assess the threat, when stakeholders may perceive the threat differently or as a whole. For contamination, the scientific indicators used assessed only diffuse contamination. Point-source contamination was not taken into consideration. Similarly, as previously mentioned, the scientific indicator for soil erosion considered only diffuse erosion as a potential hazard, that is neither the complete erosion processes nor a

measured one. Conversely, stakeholders, especially farmers, tend to visually assess erosion, considering actual and not potential erosion. In addition, stakeholders may be more sensitive to rills and gullies (concentrated erosion), as well as wind erosion, more conspicuous. This may lead to a comparison based on different types of erosion. Wind erosion, for example, is not included in the selected scientific indicator, despite it being a significant concern in France, where a quarter of soils are susceptible to wind erosion, with the Mediterranean coast having the highest susceptibility (Antoni & Kraszewski, 2018). This may help to explain the high perception of erosion around the Mediterranean coast, where strong winds may be responsible for impressive dust clouds, a phenomenon not considered in the scientific indicator map for erosion.

Regarding SOC loss, stakeholders' perceptions and scientific indicators match in only 43% of departments. The scientific indicator describes the loss of SOC between 2000-2004 and 2005-2009, while stakeholders may also consider that the SOC concentration is too low in terms of soil health. To test this hypothesis, the average SOC concentration of the topsoil in 2000-2004 was calculated for the departments where stakeholders have a lower, equivalent or higher perception of SOC loss than the national mean (Table 13). The results show that the higher the percentage of stakeholders who perceive SOC loss as an important threat, the lower the mean SOC concentration in the department in 2000-2004. When considering SOC loss, stakeholders do thus probably not only consider a decrease (i.e. a process assessed by the selected scientific indicator) but also an insufficient SOC concentration (i.e. a state of the soil).

Table 13: Assessed SOC concentrations in 2000-2004 in the topsoil (mean $\pm$ standard deviation) for the different thirds of stakeholders' perception of SOC loss (letters represent the results of an ANOVA at a confidence level of 5%).

		SOC topsoil concentrations assessed in 2000-2004 ($gC\ kg^{-1}$)
All departments		14.2 $\pm$ 4.8
Departments in which	0 to 18% of stakeholders perceive the threat	16.3 $\pm$ 4.9 ^a
	19 to 32% of stakeholders perceive the threat	14.6 $\pm$ 4.2 ^{ab}
	32 to 67% of stakeholders perceive the threat	11.8 $\pm$ 4.6 ^b

Temporal and spatial bias

Another possible explanation for the disparities is that scientific indicators and stakeholders' perceptions do not consider the threats at the same temporal or spatial scale:

(i) Scientific indicators for artificialisation and SOC loss are assessed on the basis of a change between two distinct periods: 2009 to 2021 and from 2000-2004 to 2005-2009, respectively. The indicators thus represent a change that occurred in the past, particularly in the case of SOC loss, for which the considered change occurred over a period exceeding ten years prior to the stakeholders' perception survey. It is possible that stakeholders may respond considering a more immediate situation notably for SOC or even consider the future, notably for artificialisation where the pressure on land prices may precede the actual process of artificialisation, yet be perceived by stakeholders as a tangible consequence.

(ii) For the purpose of the comparison of scientific indicators and stakeholders' perceptions, the scientific indicators were aggregated at the departmental scale. However, some departments are characterised by a high level of heterogeneity with regard to soil threats. For example, in

Brittany, Normandy and Flanders, some small agricultural areas within the departments are assessed as having a low erosion hazard, while others are assessed as having a high erosion hazard, resulting in an overall assessment of the department as “medium hazard”. In departments with high local disparities, the stakeholders interviewed may be unevenly distributed within the department, leading to an underestimation of erosion, as agriculture may take place in areas with smaller slopes for technical reasons, notably. Indeed, in mountainous areas, such as the Pyrenees and the Alps (Figure 24a and b), flatter areas are generally preferred for cultivation to strong slopes, as they present a lower hazard of erosion (Teshome et al., 2016). A comparable spatial bias may also apply in the case of threats such as compaction and SOC loss. To evaluate the importance of this bias, a more detailed survey with a co-localised acquisition of the scientific indicator and stakeholders’ perception should be conducted.

CONCLUSION

In our study, stakeholders perceived artificialisation as the most important threat in France. The spatial distribution of soil threats based on stakeholders’ perceptions and scientific indicators matches in 43% of the departments for SOC loss, and in over half of the departments for erosion (50%), compaction (51%), artificialisation (63%), and contamination (74%). However, disparities between stakeholders’ perception and scientific indicators remain in certain departments and depending on the threat. These disparities can be explained by biases in the indicators (scientific assessment or stakeholders’ perception) or in the comparison (different definitions and spatial or temporal baselines). It can be concluded that, when these biases are taken into consideration, stakeholders’ perception can be used as an indicator for soil threats and can supplement existing scientific indicators. For a further comparison, both scientific indicators and stakeholders’ perception would need to be improved. In order to enhance the precision of scientific indicators, it is essential to gain access to more detailed maps of the different soil threats, as well as further develop existing national soil monitoring systems and broaden the spectrum of contaminants included in the monitoring process. For stakeholders’ perception, further co-located surveys with interviews would be necessary to better understand the evaluation criteria used by stakeholders and to enable a more accurate spatial comparison.

3.5. Conclusion du chapitre 3

Pour suivre la santé des sols, les systèmes de surveillance apparaissent comme des outils incontournables. La plupart des pays européens étudiés en sont dotés, bien que certains aient des objectifs relativement limités, se concentrant par exemple sur le suivi du carbone organique, du pH ou des nutriments. À cette diversité des objectifs s'ajoute une hétérogénéité importante dans les approches adoptées par les différents systèmes de surveillance en Europe, qu'il s'agisse des stratégies d'échantillonnage, des paramètres suivis ou des méthodologies analytiques employées. Cette disparité constitue un défi majeur pour l'harmonisation à l'échelle européenne, particulièrement en vue de la future directive sur la surveillance des sols (SML), dont la mise en œuvre nécessite un certain degré de comparabilité des données entre pays. Harmoniser ces systèmes nécessitera de trouver un équilibre entre le respect des spécificités nationales et la mise en place de standards communs. En France, le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) illustre bien ces enjeux. Ce système national, bien établi, devra évoluer pour répondre aux exigences de la SML. Parmi les ajustements nécessaires, il sera nécessaire de réduire les intervalles entre les campagnes d'échantillonnage, actuellement d'environ quinze ans, pour les rapprocher des six ans ou moins préconisés par la SML. Il sera également nécessaire d'ajouter des sites d'échantillonnage afin de mieux représenter les différentes unités de sols (soil units) au sein des unités de rapportage (soil districts), qui, dans le cas de la France, pourraient correspondre aux régions administratives. En ce qui concerne les six paramètres pour lesquels le RMQS n'utilise pas les méthodes d'analyse ISO recommandées par la SML, il pourrait être envisagé, plutôt que de modifier directement les protocoles actuels, de développer des fonctions de pédotransfert comme alternative. Cette approche permettrait de préserver la continuité et la comparabilité des données historiques tout en facilitant la transition vers les méthodes préconisées. Cela impliquerait une période transitoire durant laquelle les deux approches de mesure seraient utilisées en parallèle, afin de calibrer les résultats et de valider les fonctions de pédotransfert, avant d'adopter pleinement les méthodes ISO. Toutefois, il est important de noter que cette transition, tout comme l'ajout de sites d'échantillonnage pour améliorer la représentativité des unités de sol, engendrerait des coûts supplémentaires considérables, qui devront être pris en compte dans la planification et le financement de l'évolution du RMQS.

L'analyse des différents systèmes de surveillance européens a révélé que certains indicateurs des menaces pesant sur la santé des sols restent encore insuffisamment mesurés, et ce pour diverses raisons. Par ailleurs, les acteurs disposent d'une bonne connaissance des sols sur lesquels ils travaillent (*Chapitre 4*). Intégrer cette connaissance sous forme d'indicateur de perception des acteurs locaux pourrait constituer une piste complémentaire intéressante pour pallier le manque d'indicateurs. Cependant, les indicateurs scientifiques et les perceptions des menaces ne concordent pas toujours, soulignant ainsi la nécessité de développer des approches méthodologiques permettant une meilleure intégration de ces deux types d'indicateurs.

Quoi qu'il en soit, ces systèmes de surveillance nationaux constituent une source de données particulièrement précieuse pour la communauté scientifique, leur permettant de développer des travaux méthodologiques et des états des lieux sur la santé des sols. Par contre, les difficultés liées à l'accès restreint aux données pour les acteurs non académiques limitent leur valorisation au-delà du cadre de la recherche scientifique. Une stratégie de diffusion plus proactive des données de surveillance, notamment sous forme de cartes produites à la demande des acteurs,

pourrait non seulement étendre leur utilisation par un éventail d'acteurs mais aussi renforcer le rôle de ces données dans l'élaboration de politiques publiques et de pratiques de gestion des sols. Cette tendance s'est confirmée ces dernières années, où le RMQS reçoit des demandes directement des ministères ou de l'ADEME (Agence de la transition écologique) pour l'évaluation des menaces portant sur les sols en France.

La poursuite de ces efforts de surveillance des sols permettra de mieux harmoniser et organiser les connaissances, et de poser des bases solides pour le transfert et l'application pratiques dans les phases ultérieures du cycle de connaissances.

CHAPITRE 4 :

Transfert des connaissances sur les sols vers les différents acteurs sur les sols



4.1. Point de vue des acteurs sur l'accès à la connaissance sur les sols en France. Quelles améliorations possibles ?

Mason, E., Cornu, S., & Chenu, C. (2023). *Stakeholders' point of view on access to soil knowledge in France. What are the opportunities for further improvement?* *Geoderma Regional*, 35, e00716. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00716>

Mason, E., Cornu, S., & Chenu, C. (2024). *Point de vue des acteurs sur l'accès à la connaissance sur les sols en France. Quelles améliorations possibles ?* *Étude et Gestion des Sols*, 31, pp.123-140. (hal-04487729)

Article en anglais publié dans *Geoderma Regional*

Soumis le 19 juillet 2023, accepté le 26 septembre 2023, disponible en ligne depuis le 27 septembre 2023

Traduit en français et publié dans *Etude et Gestion des Sols*

Soumis en décembre 2023, accepté en décembre 2023

Ce travail a fait l'objet d'une publication d'un article en anglais dans *Geoderma Regional* (présenté en **Annexe F**). Pour plus de lisibilité, sa traduction en français (publié dans *Etude et Gestion des Sols*) est présentée ici dans le corps du texte. Par ailleurs, l'article a été rédigé dans le cadre du programme EJP SOIL, et plus précisément dans le WP7 (Synthèse et intégration des connaissances) (**Annexe E**, Figure 1A).

RESUME

La vie sur terre dépend de la santé des sols. Cependant, les sols sont menacés à l'échelle mondiale. Pour répondre aux défis liés au changement climatique et à la dégradation des sols, il est nécessaire de mieux intégrer les connaissances scientifiques sur les sols dans les pratiques agricoles. L'objectif de cet article est de mieux comprendre l'accès à la connaissance des acteurs sur les sols en France et d'identifier les possibilités d'amélioration, en considérant le point de vue de six catégories d'acteurs. Cette étude est basée sur 1 951 réponses issues d'une consultation que nous avons menée en France métropolitaine. Nos résultats ont montré que la majorité des acteurs considèrent que les connaissances auxquelles ils ont accès ne sont pas adaptées à leurs besoins. Ils ont également indiqué que le partage de connaissances entre les acteurs n'était pas suffisant. Pour améliorer l'accès aux connaissances sur les sols, les acteurs ont suggéré d'adapter au niveau local le contenu des connaissances sur les sols, ainsi que d'améliorer les méthodes de partage et de transfert des connaissances. Les différentes catégories d'acteurs valorisent différents réseaux d'échanges selon leur type de connaissance. Les acteurs ayant des connaissances plus théoriques sur les sols (autorités publiques, ONG, recherche et enseignement supérieur) ont déclaré être plus intéressés par les réseaux d'échanges entre politique, recherche et société. En revanche, les réseaux d'échanges incluant les agriculteurs et les conseillers agricoles sont davantage privilégiés par les acteurs ayant une connaissance empirique sur les sols. Compte tenu de nos résultats, afin de renforcer le transfert et le partage des connaissances, nous encourageons la promotion de la profession de médiateur scientifique, ainsi que la mise en place de Living Labs et de fermes pilotes (Lighthouses farms) pour rassembler au niveau local les diverses catégories d'acteurs. Cela permettra d'assurer une transition vers une gestion plus durable des sols en Europe.

Mots-clés

EJPSOIL ; Consultation multi-acteurs ; Partage des connaissances ; Réseaux d'échanges ; Santé des sols ; Transfert de connaissances ; Vision des acteurs

INTRODUCTION

La vie sur terre dépend de la santé des sols. Ces derniers fournissent un certain nombre de services essentiels, tels que les services d'approvisionnement (en nourriture, fibres et carburant), les services de régulation (qualité de l'air et purification de l'eau), les services d'auto-entretien (formation des sols et cycle des nutriments) et les services culturels (loisirs et valeur esthétique) (Dominati et al., 2014). Cependant, les sols sont menacés dans toute l'Europe et dans le monde en raison d'un certain nombre de facteurs. La demande en denrées alimentaires, fibres et combustibles n'a cessé d'augmenter, entraînant une pression toujours plus forte sur les ressources en sols (Popp et al., 2014). En outre, la dégradation des sols s'est accrue, en raison notamment de pratiques de gestion non durables dans l'agriculture et la sylviculture, de la contamination et de l'imperméabilisation des sols dues à l'urbanisation et au développement des infrastructures (Veerman et al., 2020). À l'échelle mondiale, au moins un tiers des sols sont considérés comme modérément ou fortement dégradés (FAO et ITPS, 2015). Cette dégradation atteint 60 à 70 % des sols européens (Veerman et al., 2020). Pour éviter que la dégradation ne s'aggrave, il est essentiel de mettre en œuvre des pratiques de gestion durable des sols (Lal et al., 2021). Cela ne se produira pas sans une sensibilisation et une éducation accrues des acteurs à l'importance de la santé des sols et aux conséquences des pratiques non durables sur cette santé, deux conditions nécessaires afin de garantir que les sols soient sains et productifs pour les générations futures (Bouma, 2019).

La recherche en sciences du sol est donc essentielle pour comprendre et relever les défis complexes auxquels est confronté le système agricole actuel. Toutefois, pour combler efficacement le fossé entre l'état actuel de nos connaissances et les besoins de la société, un effort conjoint impliquant l'ensemble des acteurs est nécessaire (Mol et Keesstra, 2012). Cela inclut la recherche et l'enseignement supérieur, les autorités publiques, les agriculteurs et d'autres acteurs qui ont tous un rôle à jouer dans l'avancement de la recherche en sciences du sol et dans sa traduction en solutions concrètes. Pour cela, il est important de prendre en compte le point de vue de ces acteurs et leur niveau de connaissances sur les sols. Dans ce cadre, le programme européen conjoint sur les sols "Vers une gestion des sols agricoles durable et intelligente face au climat" (EJP SOIL, 2020-2025) est une initiative majeure de l'Union européenne visant à développer un système européen intégré de recherche durable sur les sols agricoles. Le programme EJP SOIL vise à optimiser le cycle de vie de la gestion des connaissances sur les sols (adapté d'après Dalkir, 2005). Ce cycle comprend (i) le développement de connaissances ; (ii) leur harmonisation, organisation et stockage ; (iii) leur partage et transfert ; et (iv) leur application. Pour atteindre ces objectifs, le programme EJP SOIL a adopté une approche participative qui repose sur la collaboration entre des scientifiques de 24 pays européens et des acteurs nationaux et régionaux des différents pays. La réalisation de consultation d'acteurs représente un outil efficace pour identifier les aspects critiques du cycle de vie des connaissances, afin de contribuer à ce que les sciences du sol puissent répondre au mieux aux besoins de la société (Richer-de-Forges et al., 2019).

Ainsi, une consultation auprès d'acteurs a été menée dans 20 pays du consortium EJP SOIL afin d'identifier et de hiérarchiser les principaux freins à et les possibilités d'améliorations pour l'accès aux connaissances sur les sols au niveau national et européen (Heller et al., 2021 ; Ruysschaert et al., 2021 ; Vanino et al., 2022 ; Vanino et al., 2023). Les points de vue des acteurs sur la manière d'optimiser la gestion du cycle de vie des connaissances sur les sols ont été analysés et comparés entre les pays. Les conclusions de l'étude de Vanino et al. (2023) suggèrent que, dans toute l'Europe, une augmentation du financement de la recherche et le renforcement des réseaux d'échanges pourraient contribuer à l'amélioration de la santé des sols. Pour mieux comprendre les points de vue des différents acteurs, nous avons mené une enquête complémentaire à grande échelle auprès de six catégories d'acteurs, en prenant la France comme exemple.

L'objectif général de cet article - initialement publié en anglais dans *Geoderma Regional* (Mason et al., 2023) - est de mieux comprendre l'accès à la connaissance sur les sols en France et d'identifier les améliorations possibles, en mettant l'accent sur les différents points de vue des six catégories d'acteurs choisies, à savoir les autorités publiques, les ONG, la recherche et l'enseignement supérieur, les agriculteurs, les conseillers agricoles et l'enseignement agricole. Pour ce faire, nous avons mené une consultation. Nous avons enquêté sur le niveau de connaissances sur les sols des acteurs et les sources utilisées pour accéder à ces connaissances. Nous avons également exploré les possibilités d'amélioration et les réseaux d'échanges à renforcer afin d'améliorer l'accès des acteurs à la connaissance sur les sols. Ce faisant, nous fournissons une vue d'ensemble de l'accès actuel à la connaissance sur les sols en France, et suggérons des possibilités pour l'améliorer.

METHODOLOGIE

Conception et diffusion du questionnaire

Une consultation auprès des acteurs a été menée. Les acteurs ciblés étaient : les agriculteurs, les autorités publiques (municipalités, départements, régions et ministères), les conseillers agricoles, les membres issus de la recherche et l'enseignement supérieur, des ONG, et de l'enseignement agricole (lycées agricoles). Le questionnaire (**Annexe C**) porte sur les points suivants : i) le niveau de connaissances sur les sols des acteurs ; et ii) les possibilités d'améliorer l'accès des acteurs aux connaissances sur les sols. Les questions et leur formulation ont été basées sur les questionnaires utilisés par l'EJP SOIL (Thorsøe, 2021). Des questions à choix multiples ont été posées. Le questionnaire, en français, commençait par une série de questions définissant le profil des répondants (catégorie d'acteurs, dont pour les agriculteurs le type d'agriculture - agriculture biologique, agriculture conventionnelle et agriculture de conservation des sols - et le type de production - grandes cultures, élevage ou polyculture-élevage, maraîchage et cultures pérennes ; âge ; département ; niveau de formation). Les acteurs étaient ensuite invités à estimer leur niveau de connaissances sur les sols ainsi que leur accès à ces connaissances, avec un choix entre "insuffisant", "moyen" et "suffisant". Puis deux questions visaient à déterminer si les acteurs considéraient que les connaissances sur les sols étaient adaptées à leurs besoins et si le partage des connaissances entre les acteurs était satisfaisant.

Les sources utilisées pour accéder à ces connaissances devaient alors être renseignées en choisissant parmi les options suivantes : "réseaux sociaux", "bulletins d'information électroniques", "pages web et blogs", "médias imprimés", "littérature scientifique", "littérature technique", "rapports techniques", "entre pairs" et "services de conseil agricole". Les acteurs étaient invités à identifier les freins à l'accès aux connaissances sur les sols parmi les six choix suivantes : "coût de la formation", "manque de temps", "manque de connexion entre les acteurs", "manque de structures qui partagent les connaissances", "manque de formation sur la manière de communiquer", et "formations non adaptées". Il était enfin demandé les possibilités pour améliorer cet accès parmi les choix suivants : "favoriser la recherche participative", "donner les moyens à tous les projets financés de faire de la diffusion", "recenser les besoins en contenu de formation", "soutenir la mise en place d'activités de démonstration", "favoriser une diffusion adaptée", et "favoriser la connaissance au niveau du territoire". Pour finir, il était demandé aux acteurs de choisir deux réseaux d'échanges à renforcer parmi une liste de neuf afin d'améliorer l'accès aux connaissances sur les sols : "politique-société", "recherche-société", "politique-recherche", "agriculteur-société", "agriculteur-politique", "agriculteur-recherche", "entre pairs", "conseiller-recherche", et "agriculteur-conseiller". Le questionnaire a été testé sur un échantillon d'acteurs puis a été adapté en fonction des retours. Environ 15 minutes étaient nécessaires pour y répondre. La consultation a été réalisée entre décembre 2020 et septembre 2021 sous forme d'enquête en ligne diffusée par différents moyens (réseaux, contact direct, *via* les conseillers agricoles pour les agriculteurs, etc.).

Analyse des données

Au total, 2 202 personnes ont répondu à l'enquête. Lors de la préparation des données, nous avons exclu tous les cas où les répondants avaient répondu à moins de 80 % des questions et retenu que les répondants qui faisaient partie des acteurs ciblés, soit 1 951 réponses.

Pour tester la représentativité de notre échantillon pour chaque catégorie d'acteurs, nous avons utilisé une approche par saturation. Dans cette approche, un échantillon est considéré comme représentatif lorsque l'apport de nouvelles observations (dans notre cas les réponses au questionnaire) ne modifie pas les résultats précédemment obtenus (Savoie-Zajc, 2007). Nous avons comparé les résultats recueillis jusqu'en juin 2021 (1 610 réponses) aux résultats recueillis en septembre 2021 (1 951 réponses). Aucune différence significative entre les résultats à deux dates n'étant observée, nous avons considéré que notre échantillonnage était représentatif. De plus, Ramsey et Hewitt (2005) considèrent qu'au-delà de 350 réponses, une catégorie est raisonnablement représentée, ce qui était le cas pour les conseillers agricoles et les agriculteurs.

Afin d'identifier les relations entre les réponses et les catégories d'acteurs, des analyses factorielles des correspondances (AFC) ont été effectuées pour chaque question ou groupe de questions et pour les catégories d'acteurs comportant plus de huit réponses. Pour analyser les similitudes entre les différentes catégories d'acteurs, des classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) ont été réalisées sur les deux premières composantes des AFC. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel XLSTAT (Addinsoft, 2016).

RESULTATS

Caractérisation des répondants à l'enquête

37 % des 1 951 réponses proviennent d'agriculteurs (720 réponses), 20 % de conseillers agricoles (383), 18 % d'autorités publiques (352) (Figure 26a). Les autres catégories d'acteurs - enseignement agricole (10 %, 206), recherche et enseignement supérieur (10 %, 198) et ONG (5 %, 92) - étaient moins représentées. Pour les autorités publiques, le nombre de réponses augmentait du niveau national au niveau local, avec 47 % des réponses provenant de municipalités (165 réponses) et 10 % des ministères (11, Figure 26b). Pour ce qui est du type d'agriculture, l'agriculture biologique (41 %, 295) était la plus représentée, suivie de l'agriculture conventionnelle (40 %, 289) et de l'agriculture de conservation des sols (30 %, 215) (Figure 27a). Si l'on considère le type de production, les réponses étaient plus hétérogènes avec 261 réponses pour l'élevage ou la polyculture-élevage (35 %), suivi par les grandes cultures (34 %, 250), les cultures pérennes (20 %, 147) et enfin le maraîchage (11 %, 85) (Figure 28).

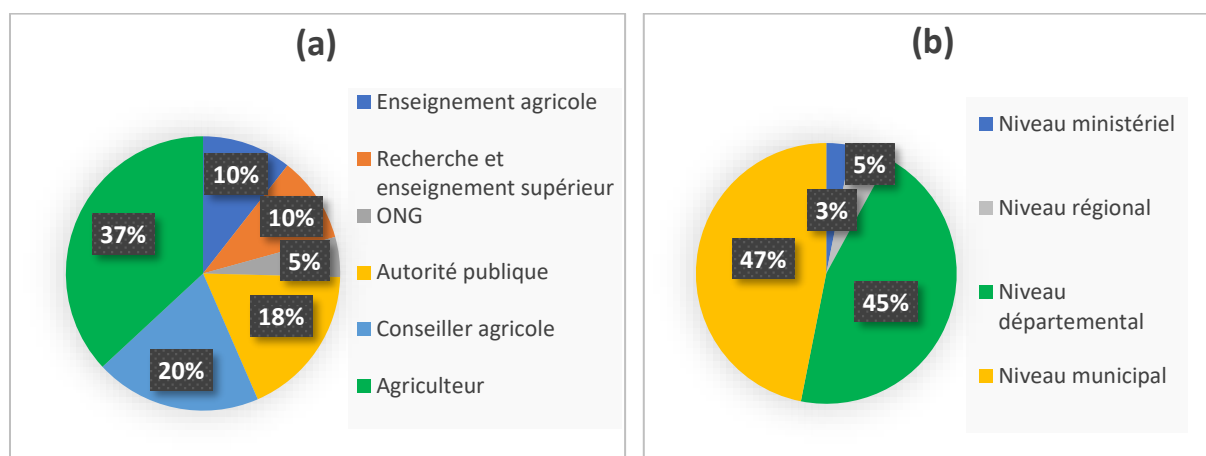


Figure 26 : Répartition des répondants en pourcentage par catégorie d'acteurs (a) et répartition par type d'autorité publique (b).

Le profil des agriculteurs ayant répondu à notre sondage a été comparé aux statistiques nationales françaises (MTES, 2018 ; Agreste, 2022). Dans notre enquête, nous avons observé parmi les agriculteurs ayant répondu une surreprésentation de ceux de moins de 50 ans et des titulaires d'un diplôme universitaire (Tableau 14). De plus, l'agriculture biologique était fortement surreprésentée puisqu'en 2021 seulement 13,4 % des exploitations françaises étaient en biologique selon le ministère MTES (2018), alors que dans notre étude 41 % des agriculteurs ont indiqué pratiquer l'agriculture biologique (Figure 27). De même, le maraîchage était surreprésenté alors que les réponses provenant d'éleveurs ou d'agriculteurs en polyculture-élevage étaient sous-représentées (Figure 28). Par ailleurs, les conseillers agricoles ayant répondu à notre sondage étaient principalement spécialisés en production animale et végétale.

Tableau 14 : Comparaison entre les réponses à notre enquête et les statistiques nationales françaises (MTES, 2018) concernant l'âge et le niveau de formation des agriculteurs.

		Distribution des agriculteurs		
		Dans notre étude		En France
		Nombre	%	%
Age	50 ans et plus	312	43%	55%
	Moins de 50 ans	408	57%	45%
Formation	Diplôme universitaire	454	63%	28%
	CAP, BEP, ou équivalent	97	13%	34%
	Baccalauréat	166	24%	25%
	Sans diplôme	3	0%	13%

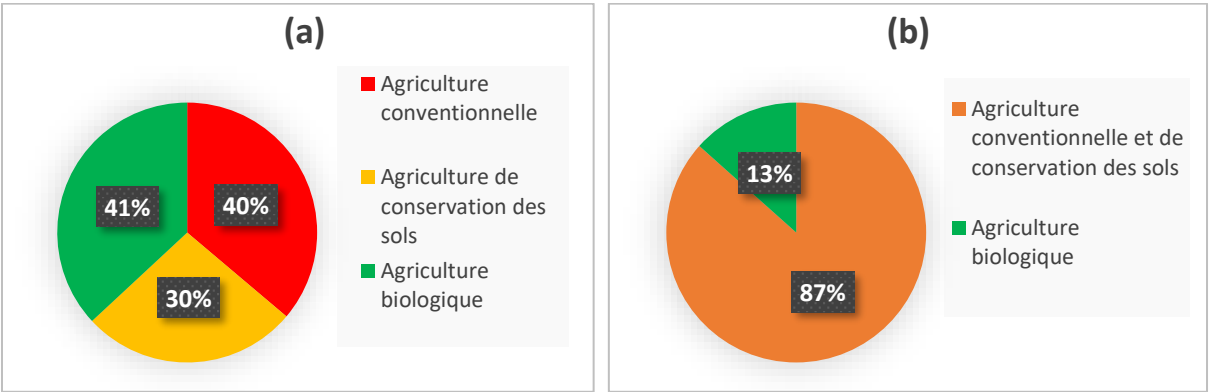


Figure 27 : Comparaison entre les réponses à notre enquête (a) et les statistiques nationales françaises (b) (Agreste, 2022) concernant le type d'agriculture pratiqué. A noter que les statistiques nationales françaises ne séparent pas l'agriculture de conservation des sols de l'agriculture conventionnelle.

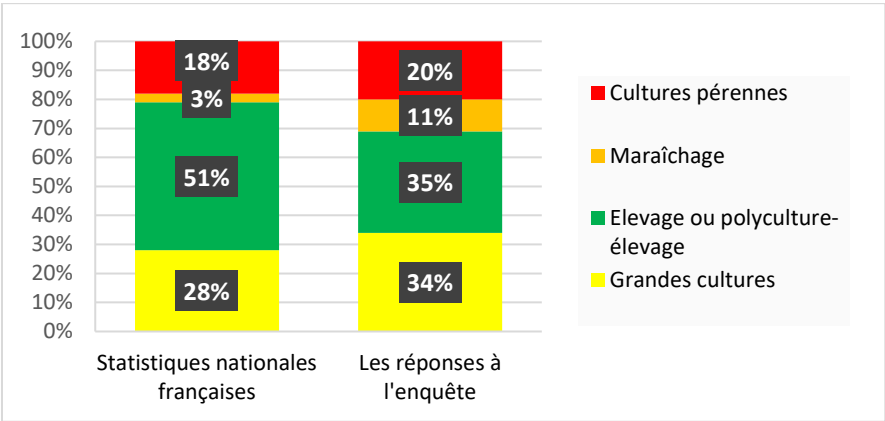


Figure 28 : Comparaison entre les réponses à notre enquête et les statistiques nationales françaises (Agreste, 2022) concernant le type de production des agriculteurs.

Tous les départements français sont représentés dans la consultation, le nombre de réponses varie d'un département à l'autre (Tableau 15) allant de 70 réponses à seulement 3 réponses. Une large part des réponses proviennent des agriculteurs pour la plupart des départements, à l'exception de cinq d'entre eux. Un département a obtenu jusqu'à 30 réponses d'agriculteurs.

Tableau 15 : Répartition par département du nombre d'acteurs ayant répondu à la consultation.

Valeur par département	Tous les acteurs	Agriculteurs	Conseillers agricole	Recherche	ONG	Enseignement agricole	Autorité publique
Minimum	3	0	0	0	0	0	0
1 ^{er} quartile	13	3	2	0	0	1	2
Médiane	18	6	4	0	1	2	3
3 ^{ème} quartile	26	11	6	1	1	3	6
Maximum	70	30	12	24	7	10	13
Moyenne	21	8	4	2	1	2	4

Notre enquête étant basée sur du volontariat, il est possible que les personnes ayant une plus grande sensibilité aux questions liées aux sols aient plus répondu que les autres. Cela pourrait expliquer la surreprésentation des jeunes agriculteurs diplômés et des agriculteurs biologiques dans notre enquête. Il convient de garder cela à l'esprit lors de l'interprétation des résultats, car cela peut induire un biais.

Niveau de connaissances sur les sols des acteurs, une auto-évaluation

Afin d'analyser le lien entre le niveau de connaissances sur les sols des acteurs et leur accès à la connaissance sur ce sujet, nous avons réalisé une analyse factorielle des correspondances (AFC) sur ces deux aspects (Figure 29). Les deux premières composantes de l'AFC expliquent près de 90 % de la variance totale. Une classification ascendante hiérarchique (CAH) réalisée sur les deux premières composantes de l'AFC a permis d'identifier deux groupes d'acteurs : (i) un premier groupe formé par les agriculteurs biologiques et de conservation, les conseillers agricoles, et les membres issus de l'enseignement agricole, de la recherche et l'enseignement supérieur, et des ONG qui considèrent généralement avoir un bon niveau de connaissances sur les sols et un accès à la connaissance moyen ou suffisant ; et (ii) un deuxième groupe formé par les agriculteurs en conventionnel et les autorités publiques qui considèrent principalement avoir seulement des notions sur les sols et un accès aux connaissances moyen ou insuffisant. Cette analyse a montré que les acteurs qui considèrent que leur niveau de connaissances sur les sols est bon estiment que leur accès à la connaissance est suffisant et vice versa. Il est important de noter que les agriculteurs en conventionnel, qui représentent plus de 80 % des agriculteurs en France, considèrent généralement leurs connaissances sur les sols limitées à des notions et leur accès aux connaissances sur les sols comme insuffisant. Ils ont également le niveau de formation le plus bas mais ont généralement une connaissance empirique du sol plus élevée, ce qui montre que le type de connaissances considérées par les agriculteurs lorsqu'ils répondent au questionnaire est théorique et probablement pas empirique.

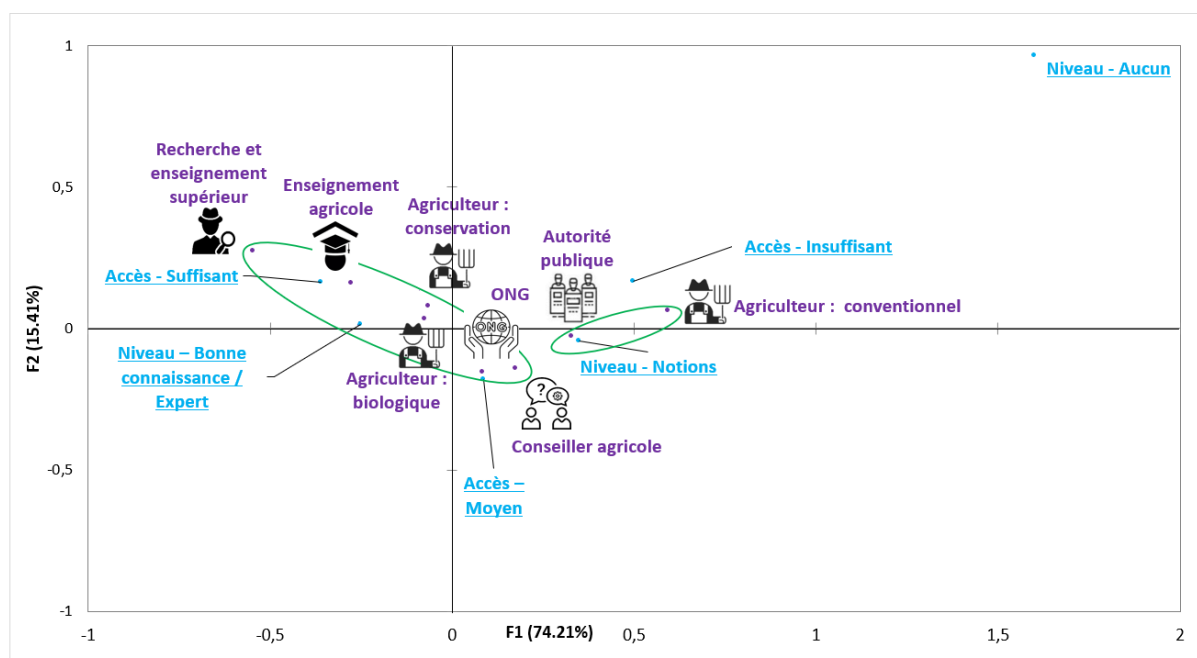


Figure 29 : Deux premières composantes de l'AFC réalisée sur le niveau de connaissances sur les sols et l'accès à la connaissance sur les sols des différentes catégories d'acteurs. Les réponses des acteurs aux deux questions sont soulignées en bleu, tandis que les acteurs sont représentés en violet. Plus les points sont proches les uns des autres, plus les réponses sont similaires. Les ellipses vertes représentent les résultats d'une CAH réalisée sur les deux premières composantes de l'AFC.

D'autre part, 60 % des acteurs ont estimé que les connaissances sur les sols étaient moyennement (49 %) ou pas du tout (11 %) adaptées à leurs besoins (Figure 30a). 90 % des personnes interrogées ont considéré que le partage des connaissances entre les acteurs était moyen ou insuffisant (44 % et 46 % respectivement) (Figure 30b). Tous les acteurs utilisent toutes les sources de connaissances disponibles pour accéder aux connaissances sur les sols, mais dans des proportions différentes (Figure 31). Les agriculteurs utilisent surtout les échanges entre pairs (16 %), tandis qu'ils utilisent peu les réseaux sociaux, les pages web, les blogs et la littérature scientifique. Les services de conseils agricoles sont principalement utilisés par les agriculteurs.

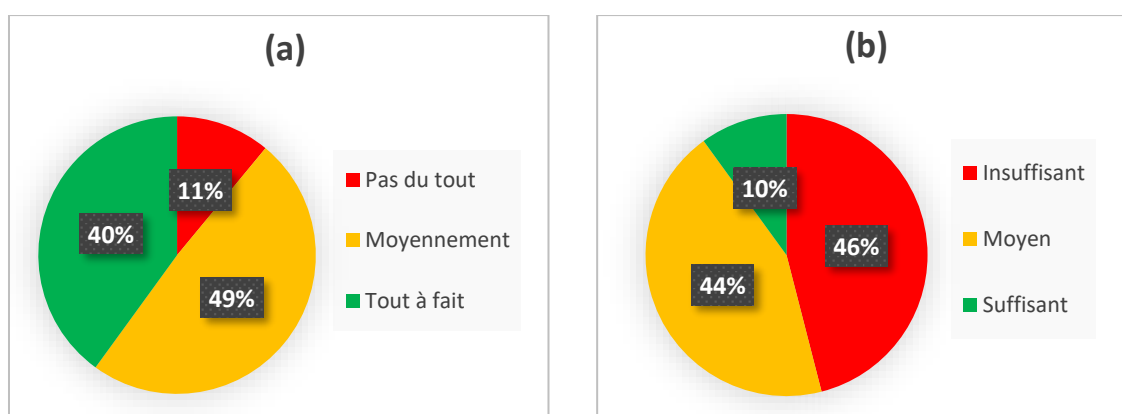


Figure 30 : Vision des acteurs sur l'adéquation des connaissances à leurs besoins (a) et qualité du partage des connaissances sur les sols (b).

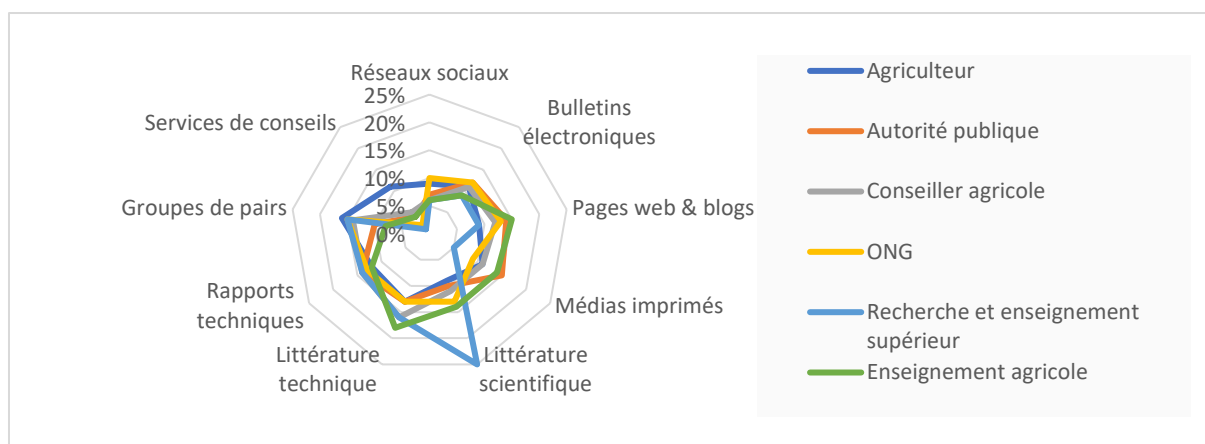


Figure 31 : Sources utilisées pour accéder à la connaissance sur les sols par catégories d'acteur.

Afin d'analyser le lien entre l'adéquation des connaissances sur les sols aux besoins des acteurs et les sources utilisées pour accéder à ces connaissances, nous avons réalisé une AFC (Figure 32). Les deux premières composantes de l'AFC expliquent près de 70 % de la variance totale. Une classification ascendante hiérarchique a permis d'identifier trois groupes d'acteurs différents : un groupe formé par les membres issus de la recherche et l'enseignement supérieur, des ONG, de l'enseignement agricole et les conseillers agricoles, tandis que les agriculteurs et les autorités publiques formaient les deux autres groupes. Le premier groupe considère généralement que les connaissances sur les sols auxquelles il a accès sont plutôt adaptées à ses besoins. Ce groupe utilise plus la littérature scientifique et les rapports techniques pour accéder à ces connaissances que les deux autres groupes. Les agriculteurs, eux, utilisent davantage les services de conseils et les autorités publiques les médias imprimés.

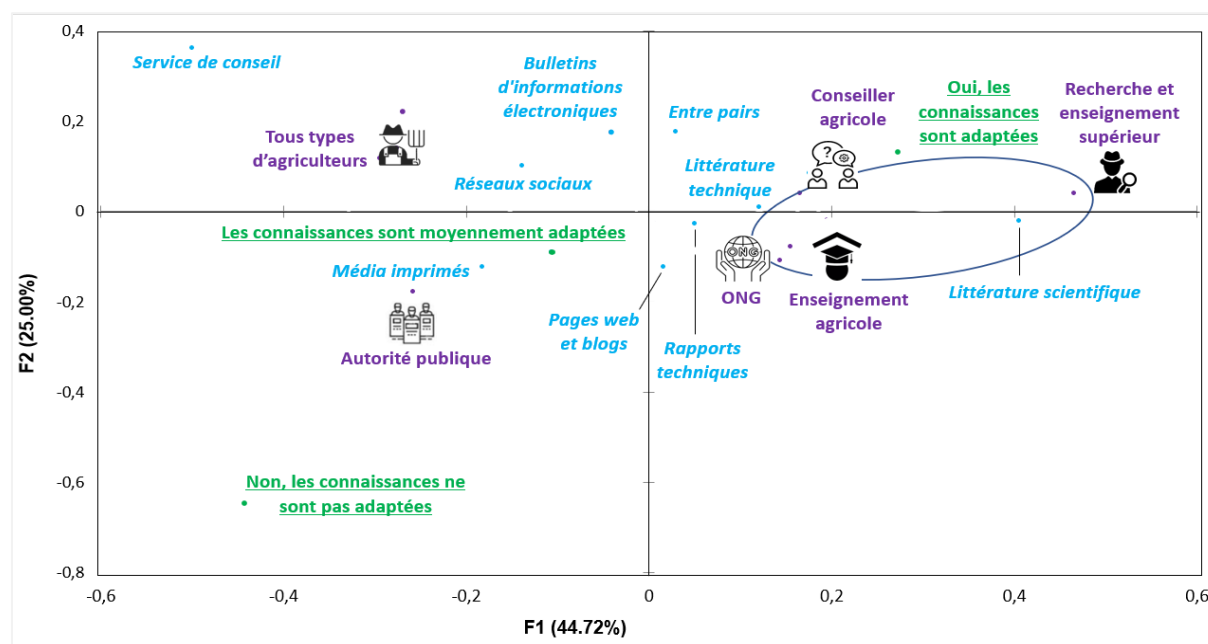


Figure 32 : Deux premières composantes de l'AFC réalisée sur les sources utilisées pour accéder aux connaissances sur les sols ainsi que sur l'adéquation entre ces connaissances et les besoins des acteurs. Les réponses des acteurs concernant l'adéquation entre les connaissances sur les sols et leurs besoins sont soulignées en vert, tandis que les sources utilisées sont représentées en bleu et en italique. Les acteurs quant à eux sont représentés en violet. L'ellipse représente les résultats d'une CAH réalisée sur les deux premières composantes de l'AFC.

La plupart des acteurs considèrent que les connaissances sur les sols auxquelles ils ont accès sont moyennement ou pas du tout adaptées à leurs besoins et estiment que le partage des connaissances sur les sols entre les acteurs est moyen ou insuffisant. Les acteurs (agriculteurs et autorités publiques) qui ont le plus déclaré que les connaissances sur les sols étaient moyennement ou pas du tout adaptées à leurs besoins, utilisent plus les services de conseils et les médias imprimés respectivement que la littérature scientifique.

Possibilité d'amélioration de l'accès des acteurs à la connaissance sur les sols

Afin d'améliorer la situation actuelle, nous avons essayé de comprendre ce que les acteurs considèrent comme des freins à l'accès aux connaissances sur les sols, ainsi que les possibilités d'amélioration qu'ils envisagent et les réseaux d'échanges qui devraient d'après eux être renforcés.

Les freins identifiés diffèrent peu entre les différentes catégories d'acteurs, c'est pourquoi les résultats ont été présentés pour l'ensemble des acteurs (Figure 33). Pour un quart des acteurs (25 %), le manque de temps est un frein majeur. Par contre le coût de la formation n'est pas considéré comme un frein (6 %). Les quatre autres freins majeurs identifiés (68 %) se réfèrent à la manière dont le transfert et le partage des connaissances sur les sols sont réalisés.

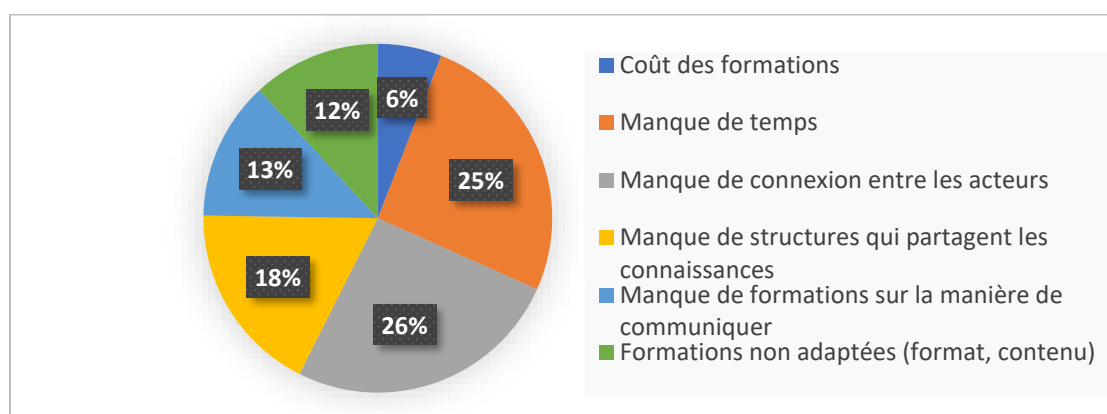


Figure 33 : Principaux freins à l'accès aux connaissances sur les sols.

Comme pour l'identification des freins, les possibilités d'amélioration de l'accès aux connaissances sur les sols diffèrent peu entre les catégories d'acteurs (Figure 34). Les trois possibilités les plus souvent citées par les acteurs concernent la manière dont les connaissances sur les sols sont partagées et transférées ("soutenir la mise en place d'activités de démonstration", "favoriser une diffusion adaptée" et "favoriser la connaissance au niveau du territoire"). Elles représentent 64 % des réponses. Les possibilités d'amélioration liées à la recherche arrivent ensuite avec 28 % pour favoriser la recherche participative et permettre aux projets de diffuser leurs résultats (17 % et 11 %, respectivement).

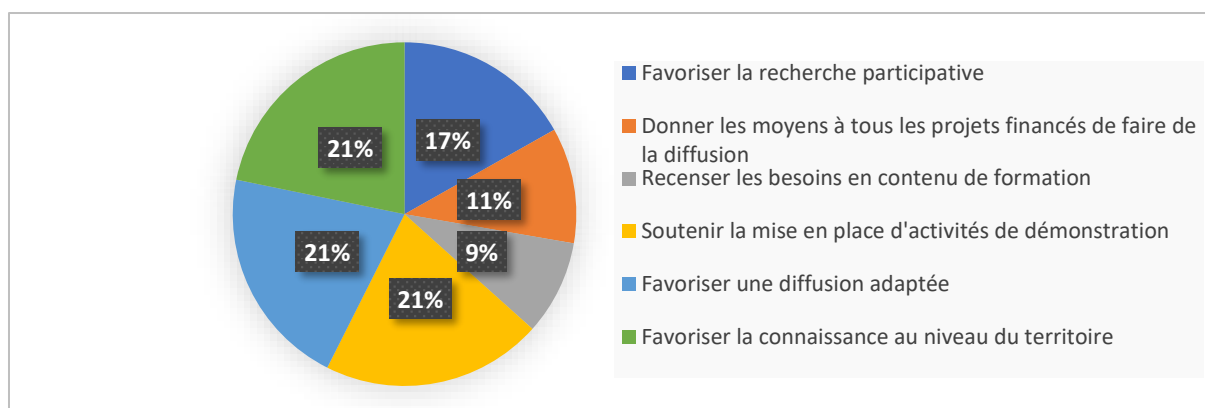


Figure 34 : Principales possibilités d'améliorer l'accès aux connaissances sur les sols.

Enfin, une AFC a été réalisée pour analyser les réseaux d'échanges à renforcer selon les acteurs. Les deux premières composantes de l'AFC expliquent 73 % de la variance totale (Figure 35). Une classification ascendante hiérarchique a permis d'identifier trois catégories différentes d'acteurs : (i) un premier groupe composé d'agriculteurs en conventionnel et de conseillers agricoles ; (ii) un deuxième groupe composé des membres issus de la recherche et de l'enseignement supérieur, des ONG et d'autorités publiques ; et (iii) un dernier groupe composé d'agriculteurs biologiques et de conservation et des répondants de l'enseignement agricole. Le premier groupe est plus favorable au renforcement des réseaux agriculteurs-conseillers ; le second aux réseaux politique-société, politique-recherche et recherche-société ; et le dernier aux réseaux agriculteur-recherche et agriculteur-politique. Tous les agriculteurs estiment également qu'il est important de renforcer les réseaux d'échanges entre pairs. Il convient de noter que les agriculteurs en conventionnel pensent qu'il faut renforcer prioritairement les réseaux agriculteurs-conseillers, tandis que les agriculteurs biologiques et de conservation proposent plutôt de renforcer les réseaux d'échanges entre pairs ainsi que ceux agriculteurs-société, politique ou recherche.

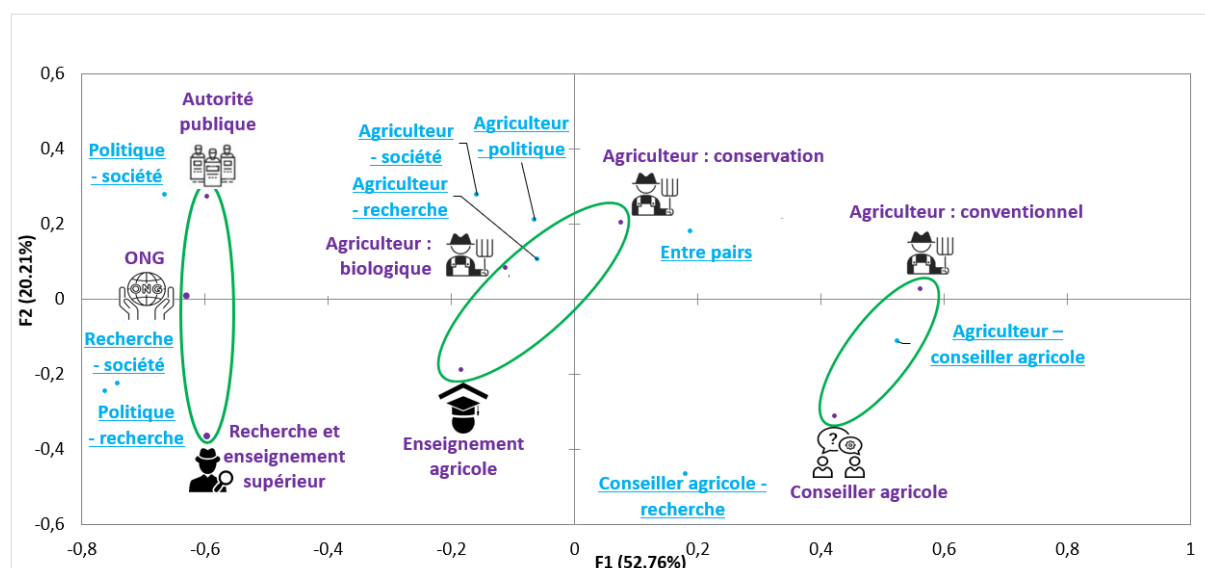


Figure 35 : Deux premières composantes de l'AFC réalisée sur les réseaux d'échanges à renforcer selon les différentes catégories d'acteurs. Les réseaux d'échanges à renforcer sont soulignés en bleu. Les différentes catégories d'acteurs sont représentées en violet. Les ellipses vertes représentent les résultats d'une CAH réalisée sur les deux premières composantes de l'AFC.

DISCUSSION

Des connaissances non adaptées sur les sols et un partage insuffisant

Dans notre étude, la plupart des acteurs considèrent que les connaissances sur les sols auxquelles ils ont accès ne sont pas adaptées à leurs besoins et estiment que le partage entre les acteurs est moyen ou insuffisant (Figure 30). Les répondants provenant de la recherche et de l'enseignement supérieur considèrent généralement que leur niveau de connaissances sur les sols et leur accès à la connaissance sur les sols sont suffisants, mais estiment que le partage de connaissances sur les sols entre les acteurs est moyen ou insuffisant. Étant donné que la recherche et l'enseignement supérieur jouent un rôle important dans la production de connaissances, il est possible qu'en répondant à cette question, ces acteurs aient considéré la manière dont les connaissances sur les sols sont partagées/transférées aux autres acteurs, tandis que les autres catégories d'acteurs ont probablement répondu à la question considérant les connaissances auxquelles ils avaient accès.

Il est important de noter que les agriculteurs en conventionnel, qui travaillent les sols, considèrent généralement qu'ils n'ont ni une bonne connaissance sur les sols, ni un accès suffisant à la connaissance sur les sols. Cela soulève la question de savoir comment les connaissances sont partagées/transférées aux acteurs et quelles sont les sources utilisées pour accéder à ces connaissances. Les acteurs qui considèrent le plus que les connaissances sur les sols sont moyennement ou pas du tout adaptées à leurs besoins, *i.e.* les agriculteurs et les autorités publiques, utilisent comme sources d'information principalement les services de conseils et les médias imprimés, respectivement (Figure 32). Feo *et al.* (2022) ont montré que les agriculteurs préféraient les groupes d'échanges entre pairs, les bulletins d'information et le matériel visuel. Dans notre étude, les praticiens (agriculteurs et conseillers agricoles) et les autorités publiques déclarent peu utiliser la littérature scientifique, comme l'ont également observé Ugolini *et al.* (2015). En revanche, la littérature scientifique est la principale source de connaissances utilisée par la recherche et l'enseignement supérieur (Figure 31).

Un autre résultat de cette recherche est le consensus sur les freins à et possibilités d'amélioration pour l'accès aux connaissances sur les sols identifiés par les acteurs (Figures 33 et 34). Les principaux freins sont associés au transfert et au partage des connaissances, comme par exemple le manque de connexion entre les acteurs ou l'absence de structures de partage des connaissances. De même, le principal frein identifié par les acteurs de 20 pays européens était le manque de réseaux d'échanges (Vanino *et al.*, 2023).

Les acteurs valorisent différents réseaux d'échanges selon leur type de connaissances

Les réseaux d'échanges à renforcer pour améliorer le transfert et le partage des connaissances sur les sols varient selon les catégories d'acteurs et dépendent du type de connaissances de ces acteurs : (i) connaissances théoriques pour la recherche et l'enseignement supérieur, les autorités publiques et les ONG, (ii) connaissances plus empiriques pour les agriculteurs et (iii) connaissances théoriques et empiriques pour les conseillers agricoles et l'enseignement agricole.

Dans notre étude, les acteurs ayant des connaissances théoriques (autorités publiques, ONG, recherche et enseignement supérieur) étaient plus intéressés par le renforcement des réseaux entre politique, recherche et société (Figure 35). D'autres études ont également souligné la nécessité pour les chercheurs en pédologie de renforcer les réseaux recherche-politique (Campbell *et al.*, 2017 ; Amundson, 2020 ; Okpara *et al.*, 2020 ; Vanino *et al.*, 2023) et les réseaux recherche-société (Bouma *et al.*, 2012).

D'autre part, les acteurs disposant de connaissances sur les sols plutôt empiriques, telles que les agriculteurs en conventionnel et les conseillers agricoles, pensent qu'il est nécessaire de renforcer plutôt les réseaux d'échanges entre pairs et entre agriculteur et conseiller (Figure 35). Ils suggèrent également un renforcement des réseaux recherche-conseiller, ce qui, curieusement, n'est pas suggéré avec autant d'importance par les acteurs de la recherche et l'enseignement supérieur. Les agriculteurs en conventionnel et les conseillers agricoles valorisent plutôt un modèle traditionnel de transfert de connaissances de la recherche vers les conseillers agricoles et enfin vers les agriculteurs, dans un format linéaire descendant. L'inconvénient de ce modèle traditionnel est l'absence de retour d'informations des agriculteurs vers les conseillers agricoles et la recherche (Kania et Žmija, 2016). Key *et al.* (2016) ont souligné l'importance d'un échange de connaissances à double sens entre les agriculteurs et la recherche.

Un troisième groupe d'acteurs constitué des répondants provenant de l'enseignement agricole et des agriculteurs biologiques et de conservation souligne l'importance de renforcer le dialogue entre les agriculteurs et la société, politique et recherche (Figure 35). Il est intéressant de noter la nette différence observée pour les agriculteurs entre les agriculteurs biologiques et de conservation, d'une part, et les agriculteurs en conventionnel, d'autre part. Il faut ici rappeler que les agriculteurs biologiques et de conservation qui ont répondu à notre enquête avaient généralement un niveau d'études plus élevé que les agriculteurs en conventionnel, ce qui explique peut-être leurs attentes plus élevées en matière d'échanges avec la recherche, la politique et la société, tandis que les agriculteurs en conventionnel qui ont répondu, moins instruits, préfèrent avoir recours à la médiation par le biais des services de conseils. L'utilisation d'une terminologie technique et d'un jargon scientifique par la recherche peut s'avérer un frein à la compréhension des messages par un public moins instruit, ce qui expliquerait les divergences dans les réponses entre les agriculteurs biologiques et de conservation et les agriculteurs en conventionnel en ce qui concerne les réseaux d'échanges avec la recherche. Il est donc important que les chercheurs transmettent des messages accessibles et compréhensibles aux agriculteurs et aux conseillers agricoles (Sharon et Baram-Tsabari, 2014 ; Hou *et al.*, 2020). En effet, les conseillers agricoles, bien qu'ils disposent souvent d'un niveau d'études élevé, ont généralement seulement des notions en sciences du sol, car leur formation porte principalement sur les productions animale et végétale.

Par conséquent, pour renforcer le transfert et le partage des connaissances, trois voies devraient être développées : (i) une voie traditionnelle de transfert des connaissances dans un format linéaire descendant en renforçant la profession de médiateur scientifique, distincte de la profession de chercheur ; il incomberait au médiateur scientifique de combler le fossé entre la recherche et les différents acteurs, ainsi que de fournir une analyse plus complète des résultats de la recherche ; (ii) la mise en place de Living Labs pour rassembler les acteurs autour de la co-construction des connaissances sur les sols, dans la mesure où les Living Labs sont des

espaces de collaboration où les chercheurs, agriculteurs et autres acteurs peuvent développer ensemble des solutions et partager des pratiques durables déjà existantes (Veerman *et al.*, 2020) ; et (iii) le renforcement des échanges entre pairs par la création de fermes pilotes (Lighthouses farms), c'est-à-dire des fermes qui, ayant obtenu des résultats notoires en matière de santé des sols, servent de modèles à suivre pour d'autres agriculteurs. D'ailleurs, la Commission européenne, consciente des lacunes actuelles en matière de communication entre praticiens, chercheurs et autorités publiques, a encouragé la création de ces deux dispositifs.

Le contenu des connaissances théoriques transférées doit être adapté aux conditions pédoclimatiques

Outre les voies précédemment identifiées pour renforcer le partage/transfert des connaissances sur les sols, il est apparu également important de promouvoir les connaissances sur les sols au niveau territorial (Figure 34). Les conditions pédoclimatiques, l'usage des sols et les systèmes agricoles variant considérablement entre les pays et les régions d'Europe (Metzger *et al.*, 2005 ; CIRCASA, 2017 ; Hessel *et al.*, 2022), chaque région est confrontée à des défis spécifiques liés aux sols. Par exemple, Vanino *et al.* (2023) montrent que "l'amélioration de la conservation des matières organiques des sols" est la principale préoccupation pour la plupart des zones européennes à l'exception de l'Europe du Sud qui considère "l'amélioration de la capacité de stockage de l'eau" comme le principal défi lié aux sols. Cette situation s'applique également à un territoire comme la France qui contient 7 des 13 zones environnementales à l'échelle européenne (Metzger *et al.*, 2005). Par conséquent, une attention accrue à la spécificité du contexte environnemental est nécessaire, dans la mesure où des solutions agricoles standard uniques se révéleraient inadaptées. Ainsi, le contenu des connaissances théoriques transférées aux acteurs devrait être adapté aux conditions pédoclimatiques locales spécifiques. Les Living Labs qui développent des solutions et des connaissances pour la gestion durable des sols adaptées localement, c'est-à-dire prenant en compte les moteurs socio-économiques, les mécanismes d'incitation et les conditions pédoclimatiques locales (Löbmann *et al.*, 2022), pourraient une fois de plus représenter un outil idéal à cet égard.

Limite de notre approche

Les travaux que nous avons menés ont été basés sur une consultation bien suivie par les différentes catégories d'acteurs. Il convient toutefois de noter certaines limites. Les enquêtes menées en ligne reposent sur une base volontaire. Il est donc possible que les personnes ayant répondu à l'enquête aient été plus enclines à participer car elles possédaient une meilleure connaissance des défis liés aux sols, comme le montre la surreprésentation des jeunes diplômés et des agriculteurs biologiques parmi les répondants. En outre, la réalisation d'une enquête en ligne peut avoir favorisé les acteurs les plus avancés sur le plan numérique et avoir été un frein pour les agriculteurs plus âgés. Enfin, l'utilisation d'un questionnaire avec des réponses prédéterminées, qui présente l'avantage d'être rapide à remplir et à traiter, a l'inconvénient de limiter la diversité des réponses possibles. Il est donc possible que des points de vue importants n'aient pas été identifiés.

CONCLUSION

Les acteurs ont largement répondu à notre enquête, avec 1 951 réponses, dont 720 provenant d'agriculteurs. En répondant à l'enquête, les agriculteurs ont montré qu'ils souhaitent améliorer leur accès aux dernières informations et recherches sur les sols. Nos résultats suggèrent que les acteurs considèrent les connaissances sur les sols auxquelles ils ont accès comme non adaptées à leurs besoins. Ils ont également révélé que le partage des connaissances sur les sols entre les acteurs n'était pas suffisant. Les acteurs pensent nécessaire de renforcer différents réseaux d'échanges en fonction de leur type de connaissances. Les acteurs ayant des connaissances plus théoriques sur les sols (autorités publiques, ONG, recherche et enseignement supérieur) pensent souhaitable de renforcer les réseaux d'échanges entre politique, recherche et société. En revanche, les acteurs ayant une connaissance empirique sur les sols pensent nécessaire de renforcer les réseaux d'échanges agriculteur-conseiller. En outre, il est apparu nécessaire de renforcer les échanges au niveau local, ainsi que les réseaux d'échanges entre pairs et en relation avec la recherche. La recherche n'est pas toujours suffisamment ancrée au niveau local et avec les praticiens, tels que les agriculteurs et les conseillers agricoles.

Par conséquent, pour combler le fossé de transfert et de partage des connaissances, trois voies sont proposées. Premièrement, la profession de médiateur scientifique devrait être renforcée. Il serait de la responsabilité du médiateur scientifique de combler le fossé entre la recherche et les différents acteurs, ainsi que de fournir une analyse plus complète des résultats de la recherche. Les acteurs pourraient être mieux informés et prendre des décisions plus éclairées. Deuxièmement, des Living Labs devraient être implantés. Les Living Labs peuvent être utilisés pour créer une plateforme de cocréation entre les acteurs mélangeant à la fois des connaissances théoriques et empiriques sur les sols pour une recherche plus ancrée au niveau local. Enfin, des fermes pilotes (Lighthouses farms), des lieux de démonstration de solutions et de résultats exemplaires, devraient être établies. Les fermes pilotes permettent de rendre concrètes les connaissances sur les sols et plus accessibles à un large public, ainsi que d'initier des échanges précieux entre les connaissances théoriques et empiriques sur les sols. Seule une combinaison de ces trois voies assurera une transition vers une gestion plus durable des sols en Europe.

CHAPITRE 5 :

La co-création, une approche innovante pour une gestion durable des sols

Sommaire

5.1.	Introduction du chapitre 5	118
5.2.	Participatory soil citizen science: An unexploited resource for European soil research	120
5.3.	Conclusion du chapitre 5	139



**Application des
connaissances**

5.1. Introduction du chapitre 5

Le chapitre précédent a révélé les limites du transfert des connaissances sur les sols en France, en montrant une inadéquation entre les besoins des acteurs et les savoirs disponibles. Lorsque le transfert de connaissances est insuffisant, la phase d'application en est directement impactée, limitant la mise en œuvre des pratiques de gestion durable des sols. Comme l'indique la Figure 11, cette lacune se reflète également dans le faible nombre de connaissances disponibles dans la phase application du cycle des connaissances sur la lutte contre les menaces et les services écosystémiques rendus par les sols. Plusieurs solutions ont été proposées dans le chapitre précédent pour combler les limites du transfert de connaissances, comme le renforcement du rôle du médiateur scientifique, l'établissement de Living Labs et de fermes pilotes (Lighthouses farms), afin de favoriser des échanges localisés et mieux adaptés aux réalités locales du terrain.

Toutefois, ces solutions pourraient gagner en efficacité si elles étaient intégrées dans une approche plus globale. Dans ce contexte, j'émet l'hypothèse que la co-création, en impliquant l'ensemble des acteurs à chaque phase du cycle des connaissances – du développement à l'application, en passant par l'harmonisation et le transfert (Figure 3) – permettrait une application durable des savoirs sur la gestion des sols. La co-création ne se limite pas à une simple transmission descendante (top-down) d'informations, mais engage tous les acteurs dans un processus interactif et continu.

Parmi les approches de co-création, deux retiennent particulièrement mon attention : les sciences participatives et les Living Labs, déjà évoqués précédemment. Ces deux approches illustrent des formes spécifiques de co-création où différents acteurs (citoyens, chercheurs, agriculteurs, entreprises, etc.) collaborent pour développer des solutions innovantes. La Figure 36 illustre la manière dont ces deux approches s'intègrent dans le concept global de co-création :

(i) Les **sciences participatives** sont une méthode de recherche qui intègre activement les acteurs non-scientifiques dans la collecte de données, l'analyse et parfois même dans la conception des recherches. Elles permettent un échange bilatéral de savoirs entre les acteurs non-scientifiques et les scientifiques, comblant ainsi le fossé entre la science théorique et les réalités locales (Reynolds et al., 2021 ; Pino et al., 2022).

(ii) Les **Living Labs**, dans le contexte des sciences du sol, sont eux des espaces collaboratifs où différents acteurs, incluant chercheurs, agriculteurs et autorités publiques, se réunissent pour co-créer des solutions innovantes adaptées à des contextes locaux spécifiques (Veeckman & Temmerman, 2021). Ces Living Labs, en tant que lieux de co-création pratique, favorisent non seulement le transfert des connaissances mais aussi l'émergence de pratiques de gestion durable des sols sur le terrain.

Ainsi, les sciences participatives impliquent particulièrement l'engagement des acteurs non-scientifiques dans la production de connaissances scientifiques, contribuant activement au processus de recherche alors que les Living Labs, de leur côté, sont des environnements d'innovation en contexte réel où la co-création se matérialise par l'expérimentation et le test de solutions en collaboration avec les utilisateurs finaux.

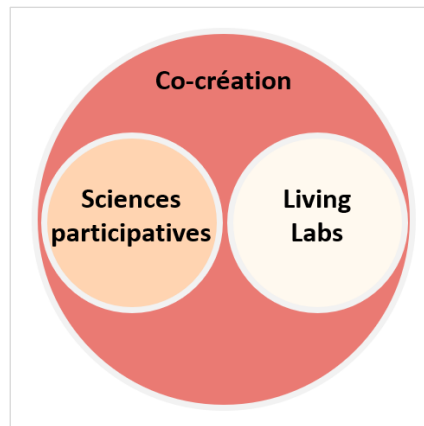


Figure 36 : Représentation des concepts de co-crédation, sciences participatives et Living Labs.

À travers une analyse des projets passés et actuels de sciences participatives sur les sols agricoles en Europe, ce chapitre, sous forme d'un article en anglais, examine l'une de ces formes de co-crédation. Bien que l'article utilise le terme "citizen science", il s'agit bien de sciences participatives, impliquant activement les acteurs non-scientifiques dans les projets scientifiques sur les sols agricoles en Europe. Ce chapitre explore comment cette approche de co-crédation peut combler les lacunes dans le cycle des connaissances, en particulier pour la mise en œuvre locale des pratiques de gestion durable des sols. Les principaux facteurs de réussite de ces projets sont identifiés afin d'examiner comment cette approche peut contribuer à l'application de pratiques améliorant la santé des sols, tout en favorisant le développement, l'harmonisation et le transfert des connaissances, et en soutenant ainsi l'ensemble du cycle des connaissances.

5.2. Participatory soil citizen science: An unexploited resource for European soil research

Mason, E., Gascuel-Oudou, C., Aldrian, U., Sun, H., Miloczki, J., Götzinger, S., Burton, V.J., Rienks, F., Di Lonardo, S., & Sandén, T. (2024). Participatory soil citizen science: An unexploited resource for European soil research. *European Journal of Soil Science*, e13470. <https://doi.org/10.1111/ejss.13470>

Article publié en anglais dans *European Journal of Soil Science (EJP SOIL special issue)*
Soumis le 3 juillet 2023, révisé le 14 février 2024, accepté le 20 février 2024

L'article a été rédigé dans le cadre du programme EJP SOIL, et plus précisément dans le WP2 (Elaborer une feuille de route pour la recherche sur la gestion des sols agricoles dans l'UE) (**Annexe E**, Figure 1A).

ABSTRACT

Soils are key components of our ecosystems and provide 95%–99% of our food. This importance is reflected by an increase in participatory citizen science projects on soils. Citizen science is a participatory research method that actively involves and engages the public in scientific enquiry to generate new knowledge or understanding. Here, we review past and current citizen science projects on agricultural soils across Europe. We conducted a web-based survey and described 24 reviewed European citizen science projects in the light of the 10 principles of citizen science and identified success factors for citizen science. Over 66% of the projects generated soil biodiversity data; 54% and 42% of the projects generated data on vegetation cover and soil organic carbon, respectively. Our findings show that soil citizen science projects aligned with the 10 principles of citizen science offer an unexploited resource for European soil health research. We conclude that promoting co-creation, fostering knowledge-sharing networks and enabling long-term communication and commitment with citizens are success factors for further development of citizen science on soils.

Keywords

EJPSOIL; European agroecosystems; Participatory research; Soil biodiversity; Soil health; Web-based survey

INTRODUCTION

Soil is a major foundation of health and wealth (FAO & ITPS, 2015). It is a finite and non-renewable natural resource that stores, filters, and transforms many substances including water, nutrients, and carbon. Soil is crucial for climate change mitigation and adaptation, agricultural production, and food security, preserving nature and biodiversity (Schirpke et al., 2017; Helming et al., 2018b). Maintaining soil health – defined by the Soil Mission 'A Soil Deal for Europe' as “the continued capacity of soils to support ecosystem services” – is vital (Veerman et al., 2020). Nonetheless, soils are threatened across Europe and globally (Popp et al., 2014; FAO & ITPS, 2015; Veerman et al., 2020). Accordingly, numerous policies have been implemented by the European Commission in recent years to promote soil health in Europe. In this framework, the EU Soil Strategy was introduced based on the European Green Deal, and it is expected to help fulfil goals outlined in both the EU Biodiversity Strategy and Farm to Fork Strategy. The European Joint Programme SOIL 'Towards climate-smart and sustainable agricultural soil management' (EJP SOIL, 2020-2025) launched by the European Union is a major initiative to develop an integrated European research community on agricultural soils. Soil science research is essential for understanding and enhancing the contribution of agricultural soils to key societal challenges. Soil health needs to be measurable (Van der Putten et al., 2023). Effectively bridging the gap between our current state of knowledge and societal needs requires a joint effort involving a diverse set of stakeholders, including the public (Mol & Keesstra, 2012). However, approximately half of the world's population is estimated to live disconnected from the natural environment (McEwan et al., 2017). This suggests that a large portion of the global population may also be disconnected from the soil.

Citizen science is a participatory research method that actively involves the public in scientific enquiry to generate new knowledge or understanding. Although there is no official definition of its methodologies and the discussion on what kind of activities and practices are part of it (Haklay et al., 2021), citizen science projects involve engaging with communities and seeking their participation in data classification, collection, and/or co-creation (Reynolds et al., 2021; Pino et al., 2022). This approach improves our ability to capture information from the field. This paper distinguishes between scientists, who are trained professionals conducting scientific research or solving scientific problems, and citizen scientists, who are members of the general public who collect and analyze data related to the natural world, typically as part of a collaborative project with professional scientists. A citizen scientist can also be a person who co-build projects with scientists that consider different type of knowledge (scientific and empirical ones) taken into account for emerging research questions, new issues around data, or new integrated knowledge. In 2015, the European Citizen Science Association (ECSA) developed best practice guidelines for good citizen science, summarized as the 10 principles of citizen science (ECSA, 2015; Table 16). These ten principles of citizen science provide a benchmark against which to examine existing citizen science projects and support the development of new high-quality projects (Robinson et al., 2018). The number of such projects is increasing rapidly (Pocock et al., 2017), including projects on soils (Ranjard, 2020; Ranjard et al., 2022). Nonetheless, results from these projects are still little published in academic journals, as evidenced by the small scientific corpus when crossing the keywords "soil" and "citizen science*". The Web of Science (consulted on 7/3/2023) provides 191 publications, two-

thirds of which have been published in the past two years. By comparison, crossing “biodiversity” and “citizen science*” yields 1,184 papers. Does this mean that it is more difficult to implement these approaches on soils versus other components of the environment? Which successes and/or difficulties are there for such projects? To answer these questions, we conducted a participatory consultation over European countries, with a focus on agricultural soils. Agricultural soils can be defined in a broad sense as soils that are cultivated and produce biomass, for food, feed, fibre, or bioenergy.

The main objective of this review was to synthesise the current understanding and use of citizen science approaches for knowledge building regarding soils across Europe. This synthesis reviews soil citizen science based on collected examples of past and current citizen science projects on soil health across Europe. The ten principles of citizen science provide a framework against which we examine the collected citizen science projects.

MATERIALS AND METHODS

To review soil citizen science in Europe with the focus on agricultural soils, we conducted a web-based survey. We invited experts and national contact points of the EJP SOIL programme, as well as any relevant contacts identified by them, to fill in our online questionnaire. Beyond experienced citizen science project managers, we also surveyed those not yet engaged in citizen science to survey the potential for such future projects. Depending on their self-reported experience with managing citizen science projects, we refer to respondents either as “citizen science coordinators” when already having (co-)organized a citizen science project, or as “citizen science novices” when not yet having applied citizen science approaches in their work. For a more comprehensible overview of the ten principles of citizen science, we grouped the principles into three distinct categories: (i) Participation in citizen science projects; (ii) Citizen science projects’ openness; and (iii) Citizen science projects’ effectiveness.

Online questionnaire

The questionnaire (**Annex D**) was based on a previous initiative by INRAE in France (Ranjard et al, 2022) and was adapted to the diversity of European countries and relative agroecosystems, as well as to our own research objective. The questionnaire included a branching logic, which directed responders to different subsections of the questionnaire depending on their answers. Three general questions were initially asked, after which the questionnaire was divided into questions for coordinators (project basics, ten principles of citizen science, EJP SOIL-related, project assessment) and for novices. Questions directed at novices were limited to strategies ensuring success in citizen science projects. Questions to citizen science coordinators were aimed at: (i) collecting examples of past and current projects focused on agricultural soil; (ii) describing the projects regarding the above ten principles of citizen science (ECSA, 2015; Table 16); and (iii) identifying success factors and challenges.

Survey respondents were recruited online through email invitations to people inside and outside of EJP SOIL through EJP SOIL national contact points and through the European Citizen Science Association's (ECSA) email-list, as well as through direct emails to citizen science projects that we could identify through EJP SOIL national contact points but did not get a response from timely. The web-based questionnaire was technically implemented with the software 'askallo' (Version 2022.6). After a pre-test with 11 people and further adaptations, the questionnaire was launched in June 2022 and was active for 4 months, until October 2022.

Data processing and analysis

All statistical analyses were performed using R version 4.2.2 (R Core Team, 2022). To create Figure 37, the R package tidyverse (v2.0.0; Wickham et al., 2019) was used. The clusters were calculated with dichotomized data and average linkage method. Figures 38 to 42 depict the frequencies of the calculated responses and were created using the R package 'ggplot2' (v3.4.2; Wickham, 2016). Figure 43 illustrates the medians of the ratings of prerequisites provided by coordinators and novices. The Friedman test was used to assess differences in the perceived importance of various prerequisites within their projects by coordinators and novices. Further pairwise comparisons using the 'pgirmess' package (v2.0.2, Giraudoux, 2023) revealed statistically significant distinctions. The Mann-Whitney U Test was used to analyze whether there were significant differences in the perceptions of coordinators and novices regarding the importance of various prerequisites.

RESULTS

Survey respondents

106 views of our survey were registered, of which 58 were complete and 48 incomplete surveys. Two projects were filtered out because they did not focus on soil, leaving 56 questionnaires in the analysis. Most of the respondents (n=56) were members of a research institute (59%) or university/college (21%). Some were from business companies (4%), NGOs (4%) or governmental administrative offices (5%). Nearly all of the respondents reported being familiar with the concept of citizen science; only one respondent had never heard of the concept before. Less than half of the respondents (43%) reported having already participated in or co-organized a citizen science project: these are defined as citizen science coordinators. The other proportion, denoted as novices, had never participated in or co-organized such a project (57%).

Description of the citizen science projects

The reported citizen science projects presented diverse characteristics. 90% of them involved Western European countries (France, United Kingdom, Belgium, the Netherlands and Ireland) (n=24). National-scale projects represented 63%, local or regional-scale projects 17%, and only 13% of the projects covered the whole of Europe. The budget for projects (n=24) varied; 25% had a budget below 50,000 €, 45% had a budget between 50,000 € and 500,000 €,

and 30% had a budget exceeding 500,000 €. The projects were mainly funded by national research funding agencies (42%), followed by a foundation/NGO/association (33%) and national agricultural or environmental funding agencies (17%). Most of the projects were short, around 60% of them less than 3 years. The shortest project was 6 months and the longest 140 months (=11.5 years). The mean project duration was 46 months and the median 29 months (n=20). The claimed reason for project completion was the end of the funding (87%) or the achievement of the scientific goals (27%). According to project coordinators (n=24), most (58%) of the citizen science projects used a crowdsourcing approach, for which citizen scientists contributed only to the collection of soil data. Nearly 30% of the projects' participatory activities went further, i.e. the citizen scientists contributed not only to data collection but also to defining research questions. The citizen scientists involved in these projects were farmers, students, teachers, citizens, and gardeners.

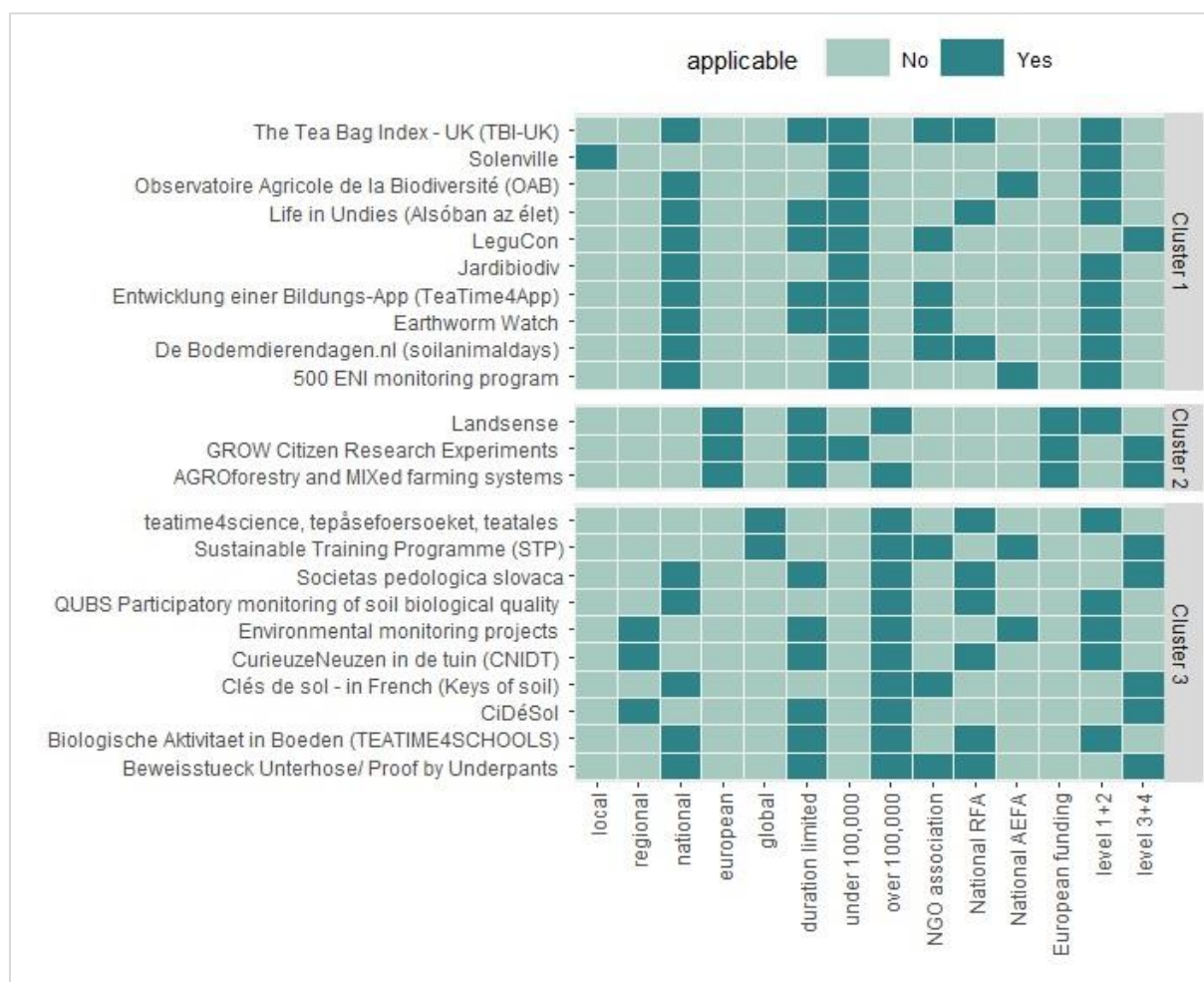


Figure 37: Description of the citizen science project (n=23) as reported by coordinators.

Among all reported citizen science projects, 23 were named by the coordinators (**Annex D**). The named projects formed three different clusters (represented in Figure 37) according to their attributes regarding the (i) geographic scope of the project, ranging from local to regional, national, European, and global scale; (ii) project duration, i.e. a limited duration or not; (iii) project budget, categorized as either 'under 100,000 €' or 'over 100,000 €'; (iv) funding source for the project, including categories such as 'foundation/NGO/association', 'national research funding agency (RFA)', 'national agricultural or environmental funding agency (AEFA)', or

'European funding'; (v) level of citizen science: the level of citizen science activities envisioned by the project coordinators, categorized into two levels (level 1+2, which includes 'crowdsourcing' and 'distributed intelligence', and level 3+4, which includes 'participatory science' and 'extreme citizen science').

Cluster 1 consisted of "National low-budget projects with a crowdsourcing approach". Most of the projects here were at a national level (only one was local). There were no projects with a regional, European, or global focus within this cluster. All projects had a budget under 100,000 €. No projects received funding from European sources. NGO associations or national funding sources were involved. Most of the projects were in the 'crowdsourcing' category. Cluster 2, "European limited-term projects", consisted solely of European-scale projects. All projects had a limited duration, with budgets both under and over 100,000 €. All received funding from European sources. One project fell into Level 1 'crowdsourcing', while two projects fell into Level 3 'participatory science'. Cluster 3, "Regional and national high-budget projects", did not include any local or European projects. Six projects had a limited duration, while four had an unspecified duration, suggesting potentially unlimited-term projects. All budgets exceeded 100,000 €. No European funding was involved, the primary funding sources consisted of NGO associations and national research funding agencies. Cluster 3 demonstrated an equal distribution of projects across different levels. Half of the projects were categorized as level 1+2, which includes 'crowdsourcing' and 'distributed intelligence', whereas the other half were categorized as level 3+4, which includes 'participatory science' and 'extreme citizen science'.

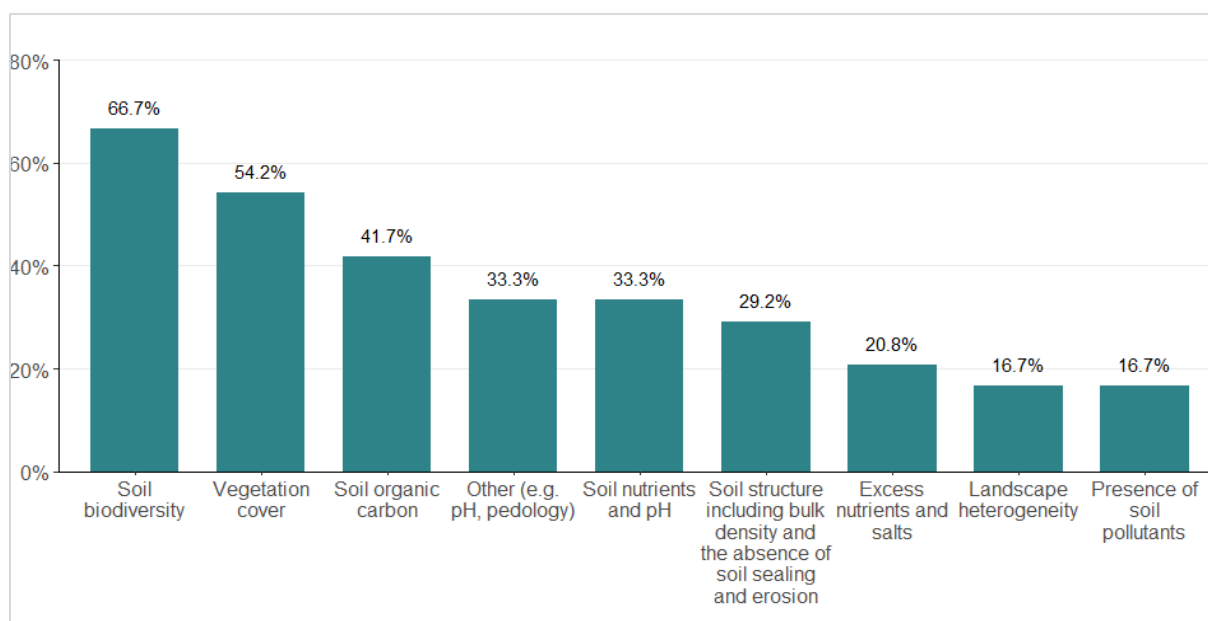


Figure 38: Soil health data generated by the citizen science projects (n=24).

Over 66% of the projects (n=24) generated soil biodiversity data. These projects included for example Earthworm Watch, Teatime4schools, and Proof by Underpants, which used earthworm surveys, teabag decomposition and microorganisms entering the teabags, as well as pants decomposition to measure biodiversity, respectively. 54% and 42% generated vegetation cover and soil organic carbon data, respectively (Figure 38). More than half of the projects studied urban gardening (58%), 42% croplands, 33% fruit and vegetables or grassland, 21% arboriculture and vineyards.

Application of the ten principles of citizen science

This analysis was performed based on the responses from citizen science coordinators and based on the ten principles of citizen science (Table 16).

Table 16: Ten principles of citizen science (ECSA, 2015)

1.	Citizen science projects actively <u>involve citizens</u> in scientific endeavour that generates new knowledge or understanding. Citizens may act as contributors, collaborators, or as project leader.
2.	Citizen science projects have a genuine <u>science outcome</u> . For example, answering a research question or informing conservation action, management decisions or environmental policy.
3.	Both the professional <u>scientists</u> and the <u>citizen scientists benefit</u> from taking part. Benefits may include the publication of research outputs, learning opportunities, personal enjoyment, social benefits, satisfaction through contributing to scientific evidence e.g. to address local, national and international issues, and through that, the potential to influence policy.
4.	Citizen scientists may, if they wish, <u>participate in multiple stages</u> of the scientific process.
5.	Citizen scientists <u>receive feedback</u> from the project. For example, how their data are being used and what the research, policy or societal outcomes are.
6.	Citizen science is considered a research approach like any other, with <u>limitations and biases that should be considered and controlled for</u> . However, unlike traditional research approaches, citizen science provides opportunity for greater public engagement and democratisation of science.
7.	Citizen science project <u>data and meta-data are made publicly</u> available and where possible, results are published in an open access format. Data sharing may occur during or after the project, unless there are security or privacy concerns that prevent this.
8.	Citizen scientists are <u>acknowledged in project results and publications</u> .
9.	Citizen science <u>programmes are evaluated</u> for their scientific output, data quality, participant experience and wider societal or policy impact.
10.	The leaders of citizen science projects <u>take into consideration legal and ethical issues</u> surrounding copyright, intellectual property, data sharing agreements, confidentiality, attribution, and the environmental impact of any activities.

Participation in citizen science projects

The first principle of citizen science as outlined by the ECSA (ECSA, 2015) is the citizens' involvement in scientific endeavour that generates new knowledge or understanding for them. In this review (n=24), citizen scientists were mainly involved in the projects as data contributors (88%), collaborators (50%) or project (co-)leaders (13%). Regarding the project tasks, citizen scientists participated in different stages of the scientific process (fourth principle of citizen science) (Figure 39, n=24). They mainly dealt with the collection of data and samples (92%), whereas the main tasks of project coordinators were applying for funding (88%), developing study design, publishing results and planning the logistics (all three 79%). Interpretation of the results (88%), analysis of data (88%) and background literature research (88%) along with study design (83%) concerned mainly scientists. Thus, the different tasks of the projects were generally not equally distributed (Figure 39).

The third principle of citizen science (Figure 40) (n=24) illustrates the benefits for the citizen scientists taking part in the projects, which in our review was reported by the coordinators and ranged from learning opportunities (91%) and satisfaction through contributing to scientific evidence (83%), to publication of research outputs (21%). The reported benefits for the scientists ranged from learning opportunities (79%), personal enjoyment and publication of research outputs (both 67%), to the potential to influence policy (54%).

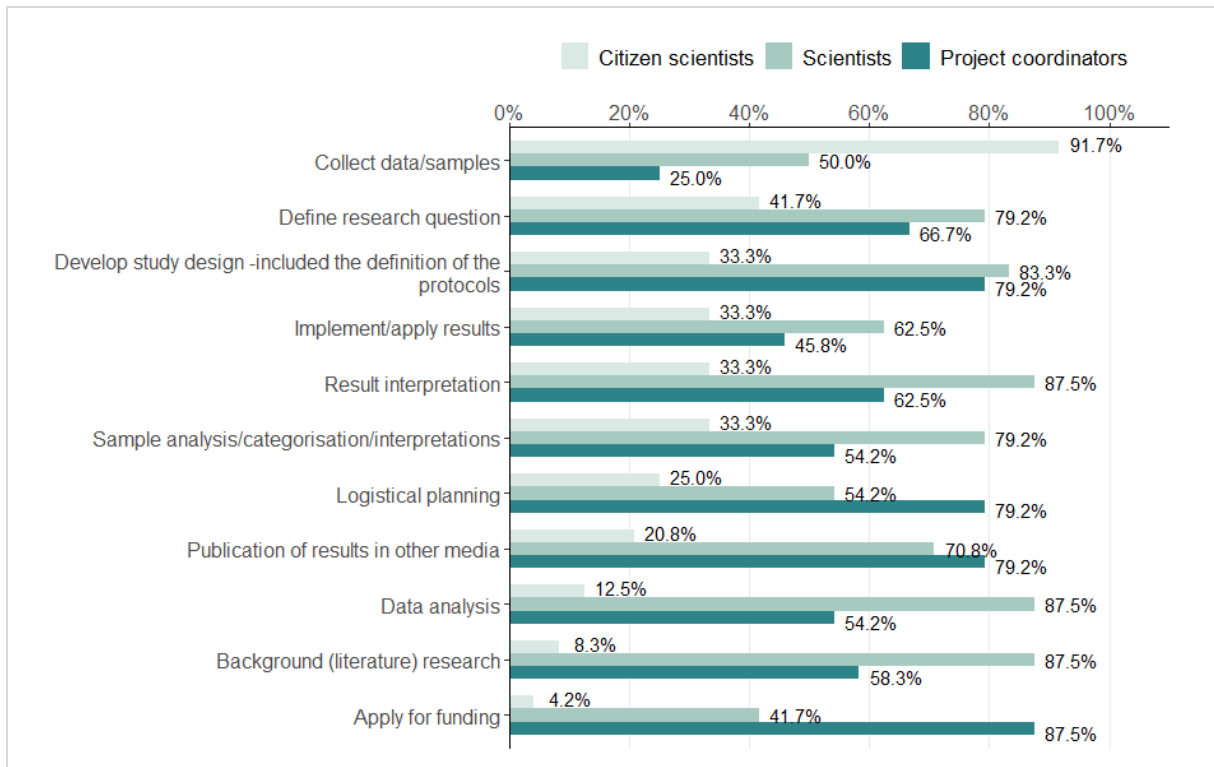


Figure 39: The tasks of citizen scientists, project coordinators and scientists in the citizen science projects (n=24).

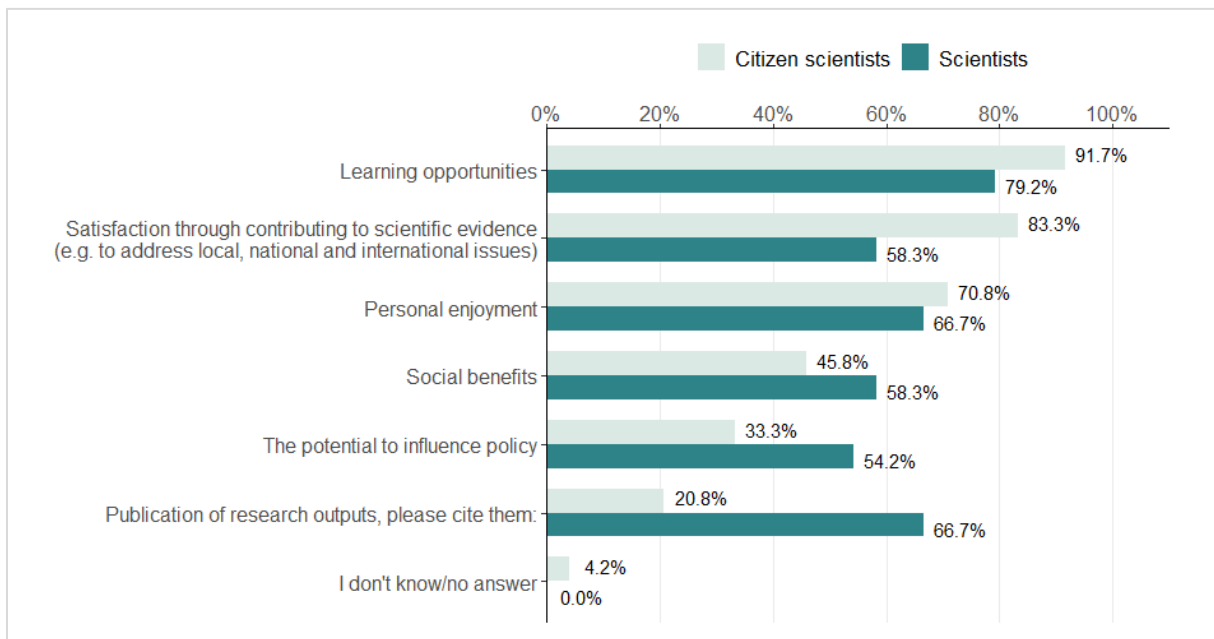


Figure 40: Benefits for scientists and citizen scientists in taking part in citizen science projects (n=24).

The fifth citizen science principle is citizen scientists receiving feedback from the project (ECSA, 2015). Over 75% of the citizen scientists (n=24) received feedback through the project webpage, and over 58% through newsletters. Personal support, workshops and Facebook were mentioned at 54%, 50%, 50%, respectively.

In most projects (83%, n=24), citizen scientists were acknowledged in the project results and publications (eighth citizen science principle; ECSA, 2015). The acknowledgments were carried out by several means such as sending emails to citizen scientists, organizing workshops, acknowledging in papers, websites, and publications. One respondent also mentioned having the selected students as co-authors in papers. The reason stated for not acknowledging citizen scientists was that the results were not published yet. The acknowledgement was planned when results would become available.

Citizen science projects' openness

The seventh citizen science principle states that citizen science project data and meta-data are made publicly available and, where possible, results are published in an open access format (ECSA, 2015). Most of the projects (58%, n=12) had their results and meta-data published in an open access format; the remaining projects that had not been published yet in an open access format reported a plan to do so. Most of the projects' results (n=24) were published on websites (79%), in reports (75%), social media (58%) and scientific peer-reviewed journals (38%). Flyer, radio, and TV were not used as often for results dissemination (33%, 29%, and 25%, respectively). Coordinators reported the intention to publish in scientific peer-reviewed journals for 58% of the projects. Some of the projects' research data and meta-data were entered into other databases (national or research infrastructure). The most reported databases were the Tea Bag Index Database, the SoilTemp database, Jardibiodiv, and INDORES.

The tenth citizen science principle states that leaders of citizen science projects take into consideration legal and ethical issues surrounding copyright, intellectual property, data sharing agreements, confidentiality, attribution, and the environmental impact of any activities (ECSA, 2015). Most of the reported projects (n=24) took into consideration confidentiality (92%), intellectual property (83%), data-sharing agreements (79%), and environmental impact (79%).

Citizen science projects' effectiveness

The second principle of citizen science is a genuine science outcome (ECSA, 2015). Examples of scientific outcomes of the reported projects were answering research questions such as the impact of soil sealing on soil functioning, or soil mapping of degraded soil and soil quality for management decisions or policy making.

Citizen science is considered a research approach like any other, with limitations and biases that should be considered and controlled for (sixth citizen science principle; ECSA, 2015). In our review, coordinators identified 'project very time consuming' and 'funding temporary' as the main research challenges for the projects (n=24).

The ninth citizen science principle states that projects are evaluated for their scientific output, data quality, participant experience and wider societal or policy impact (ECSA, 2015). In our review, around half of the projects were assessed in terms of their data quality (54%, n=24; Figure 41), but less for participant experience (46%), scientific output and societal impact (both 29%). Less than 8% had evaluated their project for policy impact. Citizen science coordinators noted that data quality was strictly controlled by experts (scientists, thematic teams or specialised technicians).

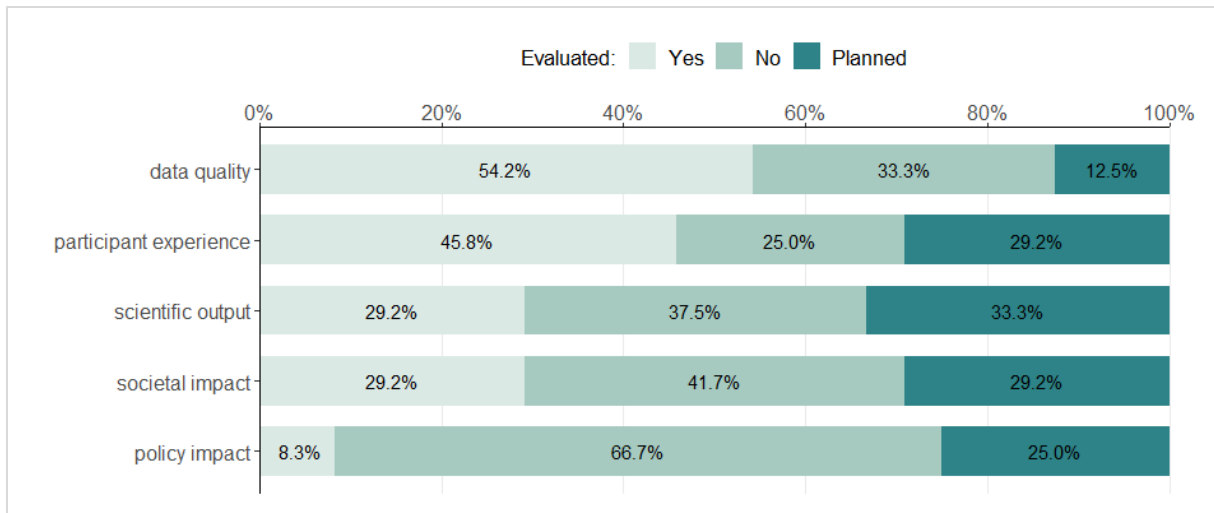


Figure 41: Reported evaluation of the CS projects by the coordinators (n=24).

How to tap into citizen science potential?

Our research revealed how citizen science project coordinators indicated the success of their project (n=24; Figure 42). Positive feedback from participants (79%), increased soil awareness among the participating citizen scientists (75%), and collaboration (63%) were the main key points of project success.

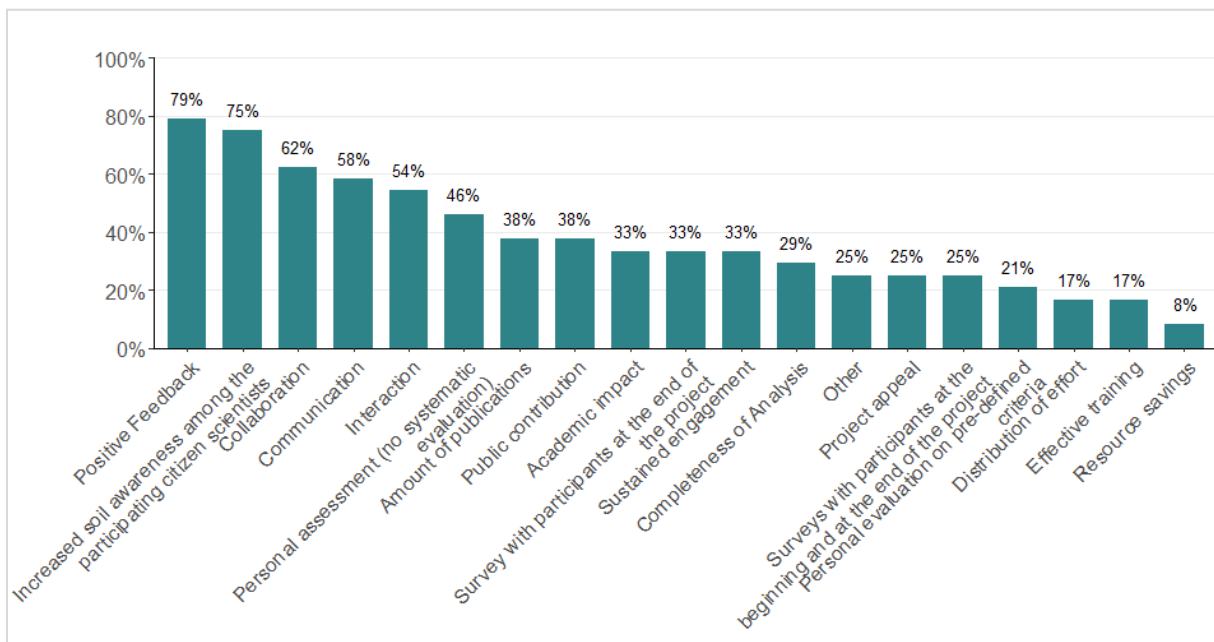


Figure 42: Reported ways to indicate the success of a project (n=24).

Citizen science coordinators and novices rated the given key factors for citizen science projects on a scale 1-6 with 1 as 'not important' and 6 as 'very important' (Figure 43). Coordinators (n=24) reported 'more staff resources' as the most important key factor (median=6) for citizen science work followed by 'more financial resources' (median=6) and 'more recognition from academia for citizen science' (median=5). Novices (n=31) identified 'more financial resources' as the most important key factor to lead a citizen science project in

the future (median=5). ‘Guiding materials for citizen science’ was also reported as an important key factor (median=5). All key factors listed in our survey were mentioned as required (or wished). Among coordinators, there was an overall significant difference in the perception of the importance of various prerequisites ($p < 0.0001$). Additional pairwise comparisons unveiled statistically significant differences, specifically between staff resources and guidance ($p = 0.017$), staff resources and internal recognition ($p = 0.001$), financial resources and guidance ($p = 0.023$), as well as between financial resources and internal recognition ($p = 0.002$). Among novices, there were no significant differences detected among the prerequisites. In the analysis of prerequisites, it was found that coordinators and novices exhibited significant differences in their perceptions of the importance of staff resources ($p < 0.001$) and financial resources ($p = 0.015$) using the Mann-Whitney U Test.

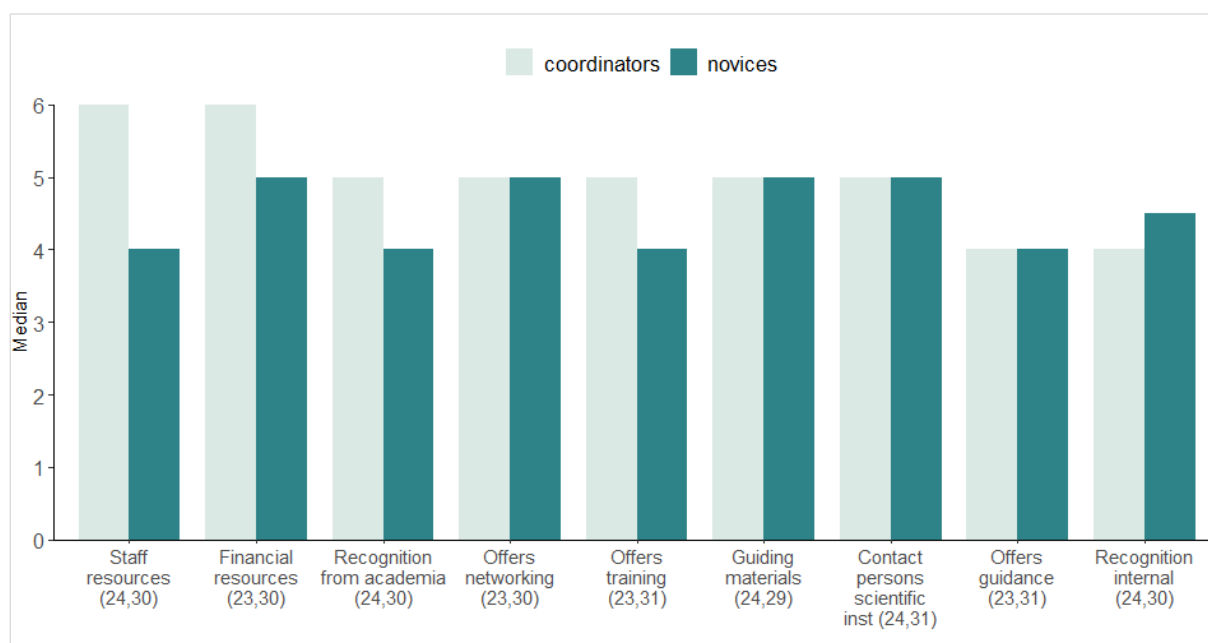


Figure 43: Important prerequisites (median score on a scale 1 to 6) reported for coordinators’ citizen science work and for citizen science novices to conduct a citizen science project in the future (n indicates the number of respondents).

Citizen science novices also shared their suggestions for improving citizen science in Europe. In general, novices noted that having a European mapping of soil citizen science would be helpful and interesting as a starting point for sharing experiences and best practices. Accessible open data and good cooperation were requested as well. Regarding networks on soil citizen science, novices highlighted their great interest in seeing collaboration improved between countries. They expressed the need to harmonize methods and to share approaches and outcomes. They wished for a long-lasting and self-supporting network.

DISCUSSION

European citizen science in a soil health perspective

Soil science projects carried out collaboratively with citizens can contribute to protecting and improving soil health (Head et al., 2020). The development of citizen science has been accompanied by an increase of citizen science projects on soils (Ranjard, 2020; Ranjard et al., 2022), as is evident in the 24 citizen science projects reviewed here. We dedicated our review to projects within Europe as the program EJP SOIL is European. Among the 24 citizen science reported, 63% were national-scale projects and 13% covered the whole of Europe. To disseminate our survey widely outside of EJP SOIL, we used focal points of each country from EJP SOIL consortium. They spread the survey within their countries. Furthermore, our review focused on agricultural soils, and citizen science projects on other types of soils such as forestry were not collected – limiting the number of projects treated. Citizen science projects addressing agricultural soils are scarce compared with those in the broader citizen science community (Ryan et al., 2018). From the 23 named citizen science projects we identified, 3 clusters emerged: (i) national low-budget projects with a crowdsourcing approach, (ii) European limited-term projects, and (iii) regional and national high-budget projects. Pino et al. (2022) also recently reviewed soil citizen science projects. They identified three main trends: (i) projects that link soil to human health, such as those focused on lead or healthy soil for food; (ii) projects focused on awareness raising and education; (iii) projects focused on soil health and productivity, such as those designed to combat soil degradation and increase agricultural productivity. For agricultural soils, the projects we reviewed mainly focused on the latter two categories. All met these two trends, i.e. educate and improve soil health.

Soil, compared to water and air, is still poorly monitored by citizen scientists due mainly to a lack of funding for soil monitoring (Fraisl et al., 2020; Head et al., 2020). Nonetheless, citizen science has a clear role to play in soil health monitoring (Head et al., 2020). Most of the projects reviewed here generated soil biodiversity data (Figure 38). Head et al. (2020) and Ranjard et al. (2022) observed a similar trend. It is relatively easy for citizen scientists to connect with organisms such as earthworms, which are relatively large and simple to find and observe without special equipment, making earthworms an ideal subject for projects (Pocock et al., 2018; Burton & Cameron, 2021). Our analysis revealed the availability of citizen science methods and toolkits appropriate for monitoring different aspects of soil biodiversity. Other generated soil health data in our review were vegetation cover and soil organic carbon, which are also related to biodiversity issues but go further towards soil conservation or climate change mitigation. The European Soil Observatory (EUSO) established a comprehensive dashboard containing indicators that present data on soil-related issues such as soil erosion, soil biodiversity, soil carbon, pollutant, soil nutrients, etc. (Panagos et al., 2022). Citizen science has an enormous potential to gather a wide range of site-specific data to contribute to the EUSO (Schillaci et al., 2022).

Fulfilment of principles of citizen science

Participation in citizen science projects

Our analysis of the answers given by the coordinators showed that the reported citizen science projects largely follow the ten principles of citizen science. Citizen scientists were reported to participate in different stages of the scientific process, but to be mainly involved as data contributors (88%) in projects (1st and 4th principles; ECSA, 2015), as similarly observed by Turrini et al. (2018). To date, the dominant method for engaging citizens in scientific research has been the ‘contributory’ method, where citizens mostly collect and submit observational data (Phillips et al., 2019). In our review, 13% of the projects involved citizen scientists as project (co-)leaders. The citizen science community is beginning to explore and adopt ‘collaborative’ and ‘co-creating’ methods, where the public are not only involved in collecting data, but also in designing projects, analysing data, and developing research questions (Robinson et al., 2018). Multiple benefits emerge with deeper involvement of citizens in scientific research, such as learning opportunities for citizens, increased public trust in research, and more effective research outcomes (Trimble & Berkes, 2013; Bonney et al., 2016). This calls for an increased participation of citizens throughout the research process.

Learning opportunities was the main reported benefit for both citizen scientists (91%) and scientists (79%) (3rd principle; ECSA, 2015) in our review. Various studies have highlighted learning outcomes, including behaviour, motivation and self-efficacy, which result from citizen scientists’ engagement in citizen science (Phillips et al., 2018; Schuttler et al., 2018). Being involved in such projects can contribute to gaining new knowledge and skills as well as increase scientific and environmental literacy (Forrester et al., 2017; Turrini et al., 2018). This is particularly important given that, until now, soil has been largely invisible to much of the population (Frelüh-Larsen et al., 2018). To further foster learning opportunities, Roche et al. (2020) suggested that, prior to launching a citizen science project, coordinators and citizen science activity planners should take the time to align educational learning outcomes and the project’s goals through a co-creational approach. Giving feedback from the project to citizen scientists (5th principle; ECSA, 2015) could also be a way to contribute to citizen scientists’ learning opportunities. Good feedback brings multiple benefits, such as encouraging more participation (Robinson et al., 2018). Another way to show citizen scientists that their contribution is recognised is to acknowledge them in the results and publications (8th principle; ECSA, 2015). In most projects reported here (83%), they were acknowledged in the project results and publications. For example, Daebeler et al. (2022) included high school students as co-authors in a scientific publication for their active involvement and scientific input.

Citizen science projects’ openness

The seventh and tenth citizen science principles relate to data sharing (ECSA, 2015). In our review, all reported projects had either their results and meta-data published in an open access format or reported planning to do so. Projects with data open to the public allow participants to use the data collected in the project for their own benefit, as well as make the findings from the project available to the interested public and scientific community. This increases the power to benefit society through use and re-use of the collected data in another research project (Cooper et al., 2021). Therefore, openness is key when it comes to citizen science projects (Heigl et al., 2019; Albert et al., 2021). Public authorities have implemented open data policies to make extensive amounts of information available to all who wish to search through, process, and

analyse it (Mazumdar et al., 2018). Most of the projects reported here considered data sharing agreements (79%). At the European level, open access publishing is already a requirement under Horizon 2020 and Horizon Europe, the EU research & innovation funding programmes from 2014 to 2020 and from 2021 to 2027, respectively (European Commission, 2016, 2017 and 2021b). However, open access is not always a systematic requirement for nationally or regionally founded projects. Indeed, many such projects are not EU projects and are not yet required to publish open access. Even so, citizen science supports open science and many resources are available for project coordinators on this topic from the wider citizen science community. This includes the working group on citizen science and open science from the European Citizen Science Association (www.ecsa.ngo/working-groups/citizen-science-and-open-science). Towards this end, Fantappiè et al. (2021) recently elaborated an improved draft agreement for soil data sharing among EJP SOIL partners and the European Soil Data Centre that could also be used in citizen science projects. That agreement consisted of a list of best suggested practices.

A few challenges remain towards open science. First, citizen science projects must protect the privacy of participants by informing them about potential threats and implementing safeguards (Bowser et al., 2014). Careful attention to data protection is essential. Complying with data protection laws is a legal requirement, such as the GDPR (Pierce & Evram, 2022). Secondly, making data open to the public implies additional costs such as the costs of publishing in an open access journal, or the costs of maintaining a webpage presenting the results and meta-data of a project. Finally, it is still being debated whether data that are open to the public should be reused without obtaining explicit consent from the citizen scientists. There is a clear contradiction between the ideals of openness and accessibility that citizen science encourages and participants' data protection (Suman & Pierce, 2018).

Citizen science projects' effectiveness

Citizen science projects are an important tool for engaging the public in scientific research and for increasing scientific literacy (Bonney et al., 2009). Such projects have been shown to have a positive effect on science, society, economy, environment, and individual participants (Heigl et al., 2019; Somerwill & Wehn, 2022). Science outcomes from these projects were reported in our review (2nd principle; ECSA, 2015): 58% of the newly generated knowledge was planned to be published in scientific peer-reviewed journals. The number of peer-reviewed publications stemming from citizen science projects is growing rapidly year by year (Follett & Strezov, 2015; Pocock et al., 2017). The same trend is observable for soil citizen science projects. When crossing the keywords "soil" and "citizen science*" in the Web of Science (consulted on 7/3/2023), two-thirds of the 191 listed publications have been published in the past two years. The success of citizen science projects depends heavily on the ability to achieve and maximize the science outcomes. Without significant scientific outcomes, the trust of citizens in the project and the motivation to participate can erode (Robinson et al., 2018).

Despite the potential of citizen science projects, their impact is often difficult to measure and evaluate. In many cases, such evaluation fails to capture the full extent of the positive impact of citizen science due to limited resources for evaluation. To ensure that projects are effective, they must be evaluated for their scientific output, data quality, participant experience, and wider societal or policy impact (9th principle; ECSA, 2015). Recently, the number of scientific articles and requests for assessing the impact of citizen science projects has increased

(Schaefer et al., 2021a). For example, the MICS project developed a state-of-the-art tool for assessing impact in five areas: society, the environment, the economy, governance, and science and technology (Wehn et al., 2021). In our review, 29% and 8% of the reported projects here were evaluated for their societal and policy impact, respectively, whilst there is a high demand for proof of societal and policy impact of citizen science practices in certain countries, e.g. in Germany (Perelló et al., 2021). Those authors expected the demand to expand to other countries in the future. Societal and policy impacts are equally crucial as scientific output and participant experience because citizen science projects could make a noteworthy contribution to establishing and implementing policies (Nascimento et al., 2018). For example, the citizen science project on insect biomass trends in Germany (Hallmann et al. 2017) has led to the adoption of the new German Insect Protection Law (BMUV 2019). In another example, in Ghana, data on beach litter from citizen science have been integrated into the official monitoring of an SDG indicator (Fraisl et al., 2022). According to von Gönner et al. (2023), citizen science project coordinators should strive to make an impact on society and politics by getting involved with decision-makers early on and ensuring that their plans are aligned with ongoing policy processes. Data quality impact, however, was more often and more easily measured. Around half of the reported projects were assessed in terms of their data quality, which shows there is still room for improvement before the inclusion of citizen science data can be easily done into existing databases (INSPIRE, 2013). Soils are still often unknown, which makes high-quality measures difficult. This makes expertise particularly important. In our review, data quality was reported to be strictly controlled by experts (scientific, thematic team or specialised technicians). Ensuring data quality in a citizen science project enhances the reputation of the project (Balázs et al., 2021). Datasets produced by citizen scientists can be of very high quality (Kosmala et al., 2016). To ensure such quality, more resources are required such as time, skills, investing in technology, and gathering participants who can help with the process (Balázs et al., 2021). Engaging with authorities, namely with policy makers and scientists, is used to strengthen the credibility of data quality (Ekström et al., 2023). CS data benefit from the application of the FAIR principles—Findability, Accessibility, Interoperability, and Reusability (Wilkinson et al., 2016). The application of the principles guides citizen scientists and CS coordinators when using CS data. When these principles are applied, in addition to respecting the 10 principles of citizen science, the chance is highest of not misusing data. For example, at the Austrian Citizen Science Platform, Österreich forscht, all presented projects need to fill in a questionnaire about their project, including questions about data quality, before being accepted to the platform.

In our review, some of the reported projects' research data and meta-data were entered into other databases (national or research infrastructure), such as the Tea Bag Index Database or the SoilTemp database. It is easier to integrate CS data into already existing databases (Sanden et al., 2021). CS data could be for example integrated into the EUSO, or into national soil monitoring databases. In 2023, the EC published the proposal for a 'Directive of Soil Monitoring and Resilience' referred to as the 'Soil Monitoring Law' (European Commission, 2023). The framework would create a common database integrating data from EU-level and member states. The 'Soil Monitoring Law' could be an opportunity to also integrate CS data to the common database. There could be a national CS representative responsible to integrate CS data to the common database, like there are national contacts to ensure that data is fulfilling INSPIRE guidelines (INSPIRE, 2013). One or more persons like this could for example be chosen from the national soil mission action groups or national citizen science networks that

already exist in many European countries. By incorporating citizen science data into existing databases, the data automatically needs to go through the same rigorous data quality checks as any data entering that particular database. Standards also need to be implemented, i.e. rules (format and meaning) by which data are described, recorded and exchanged. Throughout the entire data collection process, it is crucial to exert diligent endeavors to ensure standardized data such that they can be incorporated into long-term databases (Smith et al., 2022), such as for LTER research infrastructures (Holzer and Orenstein, 2023). Depending on which database the citizen science data would be incorporated, would indicate the requirements for the process. In addition, new technologies, such as artificial intelligence, are an opportunity to integrate data from multiple information sources in a common analytical framework (Ceccaroni et al., 2023).

How to tap into soil citizen science potential?

Our findings show that soil citizen science projects aligned with the ten principles of citizen science offer an unexploited resource for European soil research. In addition, we raise success factors for further citizen science development on agricultural soils.

First, in our review, citizen scientists were reported to participate in different stages of the scientific process and to be involved in citizen science projects as data contributors (88%), collaborators (50%), and project (co-)leaders (13%). Collaboration (63%) was also indicated by coordinators as a key success factor, and previous research has revealed this to be one of the opportunities for real transformation power at a societal level of citizen science (Turrini et al., 2018). The citizen science community is starting to explore and adopt ‘collaborative’ and ‘co-created’ methods (Senabre Hidalgo et al., 2021), where the involvement goes beyond mere data collection. When farmers and researchers join forces and develop and implement research projects over the long-term, they create a winning combination that can lead to sustainable behaviour change (Lobry De Bruyn et al., 2017). There is a need to further promote co-creation to bring together citizens (such as farmers), politicians, and scientists throughout the research process (Leino & Puumala, 2021), ultimately leading to policy outcomes (Criscuolo et al., 2023). To bridge this gap, the concept of Living Labs and Lighthouses was put forward by the European Commission through the EU Mission “A Soil Deal for Europe” (European Commission, 2021c). Living Labs and Lighthouses can be key instruments for stakeholder engagement in participatory science. These approaches can connect researchers, farmers, advisors, citizens, and politicians to create solutions with real effects as well as spread existing sustainable practices (Veerman et al., 2020). Research conducted in Living Labs and Lighthouses can contribute to the EU Mission’s goal to “ensure that 75% of soils are healthy by 2030 and are able to provide essential ecosystem services”, thus making a true societal impact.

Secondly, citizen science novices highlighted their great interest in seeing knowledge sharing improve between countries, e.g. the need to share citizen science approaches and outcomes, as well as having a long-lasting and self-supporting citizen science network. Platforms for citizen science have been set up to showcase the range of projects available. Platforms offer access to national citizen science networks that seek to promote citizen science in certain countries such as Germany (Bürger schaffen Wissen, n.d.), Australia (Atlas of Living Australia, n.d.), Switzerland (Schweiz forscht, n.d.) and Austria (Österreich forscht, n.d.) (Liu

et al., 2021). Some national platforms are tailored to a particular topic, such as the platform in France dedicated to biodiversity (OPEN Sciences Participatives, n.d.). Additionally, there are cross-national platforms such as one with projects from both the Netherlands and Belgium (Iedereen Wetenschapper, n.d.). At a European level, EU-Citizen.Science (n.d.) is an online platform established to share useful resources related to citizen science, such as tools and guidelines, best practices, and training modules. Furthermore, some citizen science networks also provide the opportunity to collaborate in working groups on particular issues, such as “legal aspects of citizen science” or “citizen science in schools”. These groups involve a variety of stakeholders. Their purpose is to advance the aims of citizen science networks by sharing resources, best practices, and relevant information among members and throughout the wider citizen science community. Ensuring that participants remain involved in these working groups brings advantages not only to the network but also to each individual participant (Liu et al., 2021). Fostering knowledge sharing through citizen science networks is therefore a second success factor for citizen science development on soils. The successful implementation of a citizen science network at a national level generally requires strong commitment from citizens (Schaefer et al., 2021b).

Finally, another success factor is enabling long-term communication and commitment with citizens. From recruiting participants, to keeping them engaged and motivated, effective communication between scientists and project participants is essential for any citizen science project (Veeckman et al., 2019; Hecker & Taddicken, 2022; Vattakaven et al., 2022). Rüfenacht et al. (2021), however, described communication as one of the main challenges for citizen science projects. Druschke & Seltzer (2012) highlighted the importance of considering the perspectives and needs of participants, as well as of maintaining active communication between scientists and project participants. De Vries (2019) recommended those creating and leading citizen science projects to be mindful that participants value communication regarding information on their collected data, findings of the project, and publications. Successful communication will enhance participants’ motivation to engage in the project and ensure their long-term commitment (De Vries et al., 2019). Pino et al. (2022) observed an increase in community engagement in various soil citizen science projects. The TeaComposition project is an example of increased community engagement: the number of schools engaged increased from seven in the first year of the project to fifty after four years (Pino et al., 2021). Citizens participating in long-term projects are more likely to develop a sense of responsibility and act towards preserving the environment than those working on shorter-term projects (Hansen & Boone, 2022). Therefore, future citizen science projects will gain from a deeper understanding of the factors that influence and limit people's motivation for long-term commitment (Phillips et al. 2019). Furthermore, in our review, ‘project very time consuming’ and ‘funding temporary’ were identified as the main challenges for the projects (n=24). The claimed reason for project completion was the end of the funding (87%). More funding is therefore needed. This would enhance the number of involved staff in the scientific community needed to coordinate and implement projects, create networks and partnerships with citizens.

CONCLUSION

Soil is a common good, so is knowledge. Citizen science can contribute to soil knowledge. This review highlights past and current citizen science projects on agricultural soils, relating them to the ten principles of citizen science. The 23 named citizen science projects focusing on agricultural soils identified here revealed 3 clusters: (i) national low-budget projects with a crowdsourcing approach, (ii) European limited-term projects, and (iii) regional and national high-budget projects. Our findings show that soil citizen science projects aligned with the ten principles of citizen sciences offer an unexploited resource for European soil health research. Promoting co-creation, fostering knowledge-sharing networks, and enabling long-term communication and commitment with citizens are success factors that will help tap into this resource and further promote citizen science involvement with soils. Further developing this research approach will require human resources and funding.

5.3. Conclusion du chapitre 5

Comme le montre ce chapitre, les approches de co-création offrent une approche globale qui permet de répondre à l'ensemble des exigences du cycle des connaissances :

(i) **Production de connaissances** : la co-création favorise la collecte et la génération de données pertinentes, en combinant savoirs théoriques et empiriques. Les projets de sciences participatives étudiés illustrent bien ce potentiel en produisant des données sur, par exemple, la biodiversité des sols, le couvert végétal ou le carbone organique du sol.

(ii) **Harmonisation des données** : ce chapitre met en évidence que les données issues des projets de sciences participatives bénéficient particulièrement de l'application des principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). Ces principes permettent d'améliorer la qualité du partage, la standardisation et l'interopérabilité des données entre les acteurs. En intégrant ses principes, la co-création permet de renforcer la collaboration entre projets locaux, nationaux et européens, garantissant ainsi une meilleure coordination dans l'harmonisation des données.

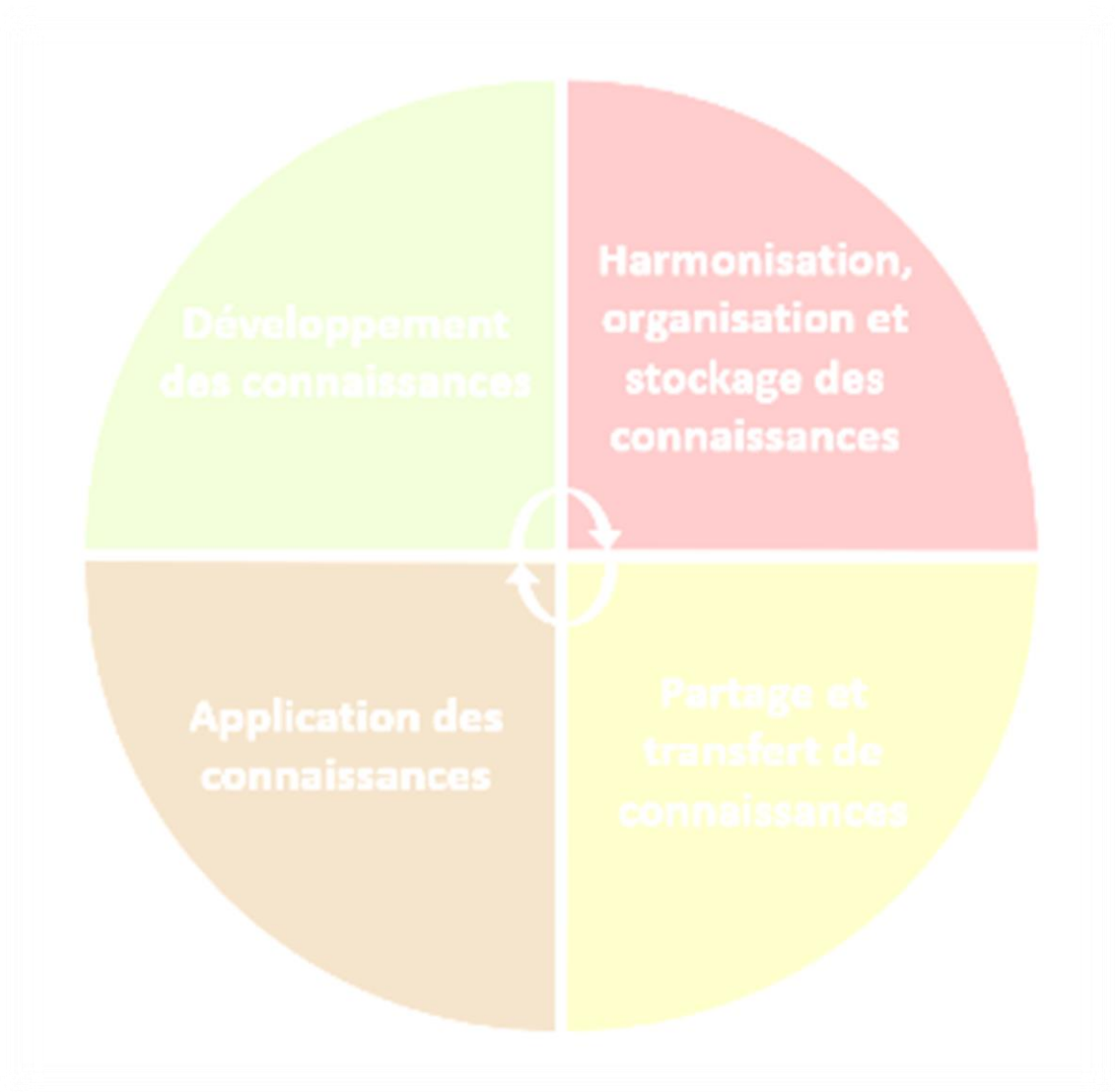
(iii) **Transfert des connaissances** : la co-création pourrait surmonter les limites des modèles linéaires traditionnels en favorisant des échanges interactifs entre divers acteurs – agriculteurs, chercheurs, autorités publiques. Ce processus encourage un véritable partage des connaissances tant empiriques que scientifiques, notamment des connaissances non seulement mieux adaptées aux contextes locaux dès leur création, mais aussi plus facilement transposables à d'autres situations.

(iv) **Application des connaissances** : en impliquant directement les utilisateurs finaux dans la conception et la mise en œuvre des solutions, la co-création devrait permettre de développer des pratiques adaptées aux besoins locaux. Elle répond ainsi à une double exigence : proposer des solutions opérationnelles et les contextualiser pour répondre aux réalités spécifiques du terrain.

Néanmoins, ce chapitre souligne que, bien que les projets de sciences participatives identifiés aient produit des données utiles à la recherche (point i), appliqué les principes FAIR (point ii), et sensibilisé les acteurs non-scientifiques à l'importance des sols (point iii), ils n'ont pas toujours impliqué les acteurs à toutes les étapes du cycle des connaissances, limitant ainsi leur portée en termes d'application (point iv).

En conclusion, la co-création apparaît comme une approche innovante capable de combler les lacunes identifiées dans l'application des différentes phases du cycle des connaissances. Elle permet non seulement de renforcer la sensibilisation et l'engagement des acteurs, mais aussi de générer des solutions concrètes et applicables à grande échelle. En mobilisant des outils spécifiques de co-création, tels que les Living Labs et les projets de sciences participatives, il serait possible d'aller plus loin en ancrant davantage les connaissances au niveau local, en favorisant des échanges interactifs entre acteurs et en développant des pratiques adaptées aux réalités du terrain. Ces approches renforceraient ainsi la gestion durable des sols.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES



CONCLUSION

Le concept de santé des sols est essentiel pour lutter contre les multiples menaces qui les dégradent, tout en assurant la fourniture de services écosystémiques cruciaux. La gestion durable des sols joue un rôle central dans la réponse à ces défis. Des pratiques telles que la diversification agricole, notamment l'agroforesterie, s'avèrent particulièrement efficaces pour accroître la biomasse, atténuer et s'adapter au changement climatique, améliorer les services écosystémiques, et réduire la dégradation des sols (Helming et al., 2018a ; Tamburini et al., 2020 ; Strauss et al., 2023).

Bien qu'un vaste corpus de connaissances sur la réduction de la dégradation des sols (menaces) soit disponible, les aspects liés aux services écosystémiques des sols demeurent moins développés et appliqués (chapitre 2). Notre analyse révèle également que le transfert des connaissances et leur application sur le terrain demeurent limités. En effet, les acteurs considèrent les connaissances sur les sols auxquelles ils ont accès comme non adaptées à leurs besoins, et le partage des connaissances entre les acteurs comme insuffisant (chapitre 4). Ce constat reflète une des limites du modèle linéaire classique d'acquisition, transfert et application des connaissances, où un décalage temporel entre ces phases est souvent observé. Ce décalage explique pourquoi les connaissances sur les menaces, étudiées depuis plus longtemps, sont mieux partagées et appliquées que celles portant sur les services écosystémiques (chapitre 2). Si ce modèle linéaire a permis, à la longue, une diffusion efficace des connaissances sur les menaces, il reste insuffisamment réactif face à l'urgence de la crise environnementale actuelle. En effet, avec 60 % des sols en Europe considérés comme dégradés (Panagos et al., 2024), l'effondrement de la biodiversité et les impacts croissants du changement climatique, il devient impératif d'accélérer le processus de transfert et d'application des connaissances, tout en développant des savoirs mieux adaptés aux particularités locales. Ce constat a conduit l'Union européenne à soutenir la mise en place de 100 Living Labs et fermes pilotes (Lighthouses farms) d'ici 2030 (European Commission, 2021c).

L'ensemble de mes travaux montre que les approches de co-crédation permettent de dynamiser ce cycle des connaissances en intégrant simultanément le développement, l'harmonisation, le transfert et l'application des savoirs, contrastant ainsi avec le modèle classique linéaire de développement de connaissances, qui repose souvent sur un transfert unidirectionnel. La co-crédation, en tant que processus global, qui inclut toutes les étapes du cycle de connaissances, peut prendre des formes variées, telles que les sciences participatives et les Living Labs. Mes travaux ont montré que ces approches pourraient :

- Fournir des indicateurs complémentaires pour évaluer les menaces ainsi que la santé des sols. Notre analyse des projets inventoriés de sciences participatives sur les sols agricoles (chapitre 5) a montré que plus de 66 % des projets ont généré des données sur la biodiversité des sols, tandis que 54 % et 42 % ont permis de recueillir des données sur le couvert végétal et le carbone organique des sols, respectivement. Par ailleurs, alors que certains indicateurs de menaces sur les sols demeurent insuffisamment mesurés pour diverses raisons, l'intégration des perceptions des acteurs locaux constitue une piste prometteuse pour mieux appréhender ces menaces (chapitre 3). En effet, la perception des acteurs locaux concorde avec celles des indicateurs scientifiques dans 43 % des

départements pour la perte de carbone organique des sols, et dans plus de la moitié des départements pour l'érosion (50 %), la compaction (51 %), l'artificialisation (63 %) et la contamination (74 %). Ces concordances partielles révèlent des divergences entre perceptions et indicateurs scientifiques, soulignant la nécessité de développer des méthodes pour mieux les comparer et les intégrer. En outre, transformer les perceptions des acteurs locaux en indicateurs permettrait non seulement de combler les lacunes actuelles en termes de données, mais aussi d'encourager une meilleure appropriation des données issues des systèmes de surveillance par ces mêmes acteurs.

- Améliorer le partage des connaissances sur les sols entre les différentes sphères de la société. Cette approche vise non seulement à diffuser les connaissances scientifiques de manière adaptée, mais aussi à intégrer les savoirs empiriques que les acteurs non académiques possèdent. Une large participation à notre enquête, avec 1 951 réponses dont 720 d'agriculteurs, témoigne de leur volonté d'accéder aux résultats de recherche les plus récents sur les sols (chapitre 4). Cependant, la recherche reste souvent insuffisamment ancrée au niveau local et connectée aux besoins des praticiens. Le développement de Living Labs et de fermes pilotes constitue une réponse prometteuse à ces écueils.
- Tester et développer des pratiques de gestion des sols adaptées aux conditions locales tant environnementales (sols, climat) qu'économiques (usage des terres, débouchés, niveau de vie décent pour les producteurs) et socio-culturelles (vision des acteurs de leur rôle dans la société). Les Living Labs et les fermes pilotes permettraient d'ajuster davantage les pratiques aux conditions réelles et de démontrer des solutions concrètes adaptées aux défis locaux (*chapitre 2*).

En outre, l'Union européenne est en train de se doter d'outils législatifs, notamment la Soil Monitoring Law (SML), actuellement en discussion, pour relever ces défis (European Commission, 2023). Cette législation pourrait nécessiter un suivi de la santé des sols basé sur des systèmes de surveillance nationaux. Bien que de tels systèmes existent déjà dans la plupart des pays européens, certains de ces systèmes restent encore limités au suivi de paramètres spécifiques, comme le carbone organique, le pH ou les nutriments (chapitre 3). Ces systèmes pourraient constituer une base pour l'implémentation de la Soil Monitoring Law, cependant leur utilisation conjointe se heurte à la diversité des protocoles de surveillance, reflétant des spécificités nationales et régionales, ce qui complique toute harmonisation. Par contre, ces systèmes de surveillance représentent une source de données précieuse pour la communauté scientifique, facilitant le développement de travaux méthodologiques ainsi que des états des lieux sur la santé des sols. L'accès à ces données pour les acteurs non académiques reste restreint, ce qui limite leur valorisation au-delà du cadre de la recherche scientifique (chapitre 3).

PERSPECTIVES

L'un des grands enjeux des années à venir en matière de santé des sols, outre le développement de connaissances scientifiques, notamment autour des indicateurs de santé, de menaces et les valeurs de référence associées, réside dans la capacité à compléter le cycle des connaissances. Cela implique non seulement l'harmonisation des données acquises sur les sols entre les différents pays européens, mais aussi le partage de ces connaissances avec les différentes sphères de la société et leur application concrète, notamment dans le domaine agricole. À l'instar de toutes les problématiques environnementales, répondre à ces enjeux nécessite une approche globale et intégrée. Cette approche devra être renforcée dans les années à venir pour atteindre l'objectif ambitieux fixé par la Commission européenne : parvenir à 100 % de sols sains d'ici 2050 (European Commission, 2023).

Promouvoir des recherches coconstruites et inclusives

Une piste pour atteindre cet objectif est le développement de recherches coconstruites impliquant l'ensemble des acteurs issus des différentes sphères de la société. Ces approches permettraient de faire progresser simultanément toutes les phases du cycle des connaissances (chapitre 5). Toutefois, elles doivent éviter plusieurs écueils pour maximiser leur impact. D'une part, il est essentiel d'associer les acteurs non-scientifiques dès la conception des projets pour éviter de réduire leur rôle à un simple transfert d'informations ou de données vers la recherche. D'autre part, ces approches ne doivent pas conduire la recherche à : (i) se limiter à des thématiques strictement appliquées, car sans recherche fondamentale, aucune innovation à long terme ne sera possible ; (ii) perdre en généralité en se focalisant exclusivement sur des études de cas spécifiques. La mise en réseau européenne de nombreux Living Labs et fermes pilotes (Lighthouses farms) pourrait constituer un levier efficace pour surmonter ces obstacles.

Vers des approches transdisciplinaires intégrant pleinement les sciences sociales

Les acteurs des sols possèdent une connaissance approfondie des sols sur lesquels ils travaillent, ainsi qu'une perception des menaces qui pourrait constituer un indicateur complémentaire aux indicateurs biophysiques mesurés (chapitres 3 et 4). Cependant, pour exploiter pleinement ce potentiel, plusieurs questions doivent être explorées :

- Comment ces acteurs intègrent-ils leurs connaissances des sols dans leurs pratiques professionnelles ?
- Quels types d'indicateurs (mesures, observations, indicateurs empiriques) influencent leur perception des menaces ?
- Dans quelle mesure leur environnement social (médias, dynamique économique, etc.) modifie-t-il ces perceptions ?

Ces questions nécessitent une collaboration étroite entre sciences biophysiques, économiques et sociales pour être pleinement explorées et appliquées dans des politiques publiques.

Vers une approche pan-européenne et globale

Les ambitions de la Commission européenne visent à couvrir l'ensemble des sols européens. Cependant, les travaux de cette thèse, en lien avec le programme EJP SOIL, se sont concentrés sur les sols agricoles des pays participants. Il serait nécessaire d'élargir cette analyse des systèmes de suivi à l'ensemble des occupations des sols (ce qui actuellement n'a été fait que pour les pays ayant un système couvrant l'ensemble des occupations) et aux pays de Balkans non représentés dans l'EJP SOIL. Un processus de transfert de compétences entre les pays pourrait être envisagé.

Pour répondre aux exigences de la SML, une harmonisation des systèmes de suivi est nécessaire, notamment sur le choix des indicateurs mesurés. Si la SML propose pour l'instant une liste minimale de paramètres de base à mesurer, inspirée du projet SIREN (Faber et al., 2022), ces indicateurs doivent être accompagnés de valeurs seuils ou cibles définies par chaque pays selon leurs contextes locaux. Cependant, il serait souhaitable que leur détermination repose sur des méthodes communes afin d'assurer une comparabilité à l'échelle européenne. Une collaboration renforcée entre les pays sera nécessaire pour établir ces méthodes communes, permettant ainsi de respecter la diversité des contextes tout en assurant une cohérence dans les évaluations des sols à travers l'Europe.

Toutefois, cette harmonisation doit être menée avec précaution afin de préserver la qualité scientifique des données obtenues :

- Le choix d'indicateurs doit s'effectuer sur la base de leur pertinence scientifique afin de représenter correctement les menaces et services écosystémiques ciblés. Ainsi, des choix par défaut, basés sur des paramètres faciles à mesurer mais peu pertinents, doivent être évités. Par exemple, l'utilisation de la concentration en carbone organique du sol (SOC) pour représenter la perte de SOC est problématique, car elle substitue la description d'un processus, perte de SOC, soit une variation, à un état, la concentration/stock, ce qui correspond à deux réalités différentes. Certains paramètres, comme la densité apparente ou les caractéristiques des horizons profonds (au-delà de 30 cm), doivent être intégrés, même si leur analyse est plus exigeante. Ces paramètres sont cruciaux pour évaluer de manière rigoureuse la santé des sols. A ce titre, la référence actuelle au système LUCAS pose question et nécessiterait des évolutions significatives (LUCAS échantillonnant seulement l'horizon 0-20cm).
- Le recours aux fonctions de pédotransfert ne peut se faire que pour des méthodes comparables. Bien que les fonctions de pédotransfert offrent une solution pratique pour harmoniser les évaluations entre pays, leur utilisation n'est pertinente que lorsque les méthodes comparées mesurent réellement les mêmes paramètres. Par exemple, dans le cas des pollutions métalliques, certaines méthodes fournissent des concentrations totales (extractions à l'acide hydrofluorique, fusion alcaline, fluorescence X notamment) alors que d'autres ne fournissent que des concentrations pseudo-totales (extraction à l'eau régale), ou d'une fraction extractible (EDTA, NaNO_3 , CaCl_2) (Cornu et al., 2023). S'il peut être envisagé de développer des fonctions de pédotransfert entre les méthodes d'analyse des concentrations totales, des fonctions qui mélangeraient des méthodes totales à d'autres méthodes seraient plus hasardeuses, et ne pourrait en aucun cas être génériques de tous les types de sols.

BIBLIOGRAPHIE

- Addinsoft (2016). XLSTAT 2016: data analysis and statistical solution for Microsoft Excel. Available at: <https://www.xlstat.com/fr/> [Last accessed 5 July 2023]
- Agreste (2022). Chiffres et donn'ees. Mai 2022 N°5. Statistique agricole annuelle 2021. Available at: https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2205/cd2022-5_SAA_2021Provisoire-v4.pdf [Last accessed 5 July 2023].
- Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S., & Blöschl, G. (2018). Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology*, 557, 631–642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.052>
- Alavi, M., Lohrasbi, F., Thapa, D. K., Biro, E., Lai, C., & Cleary, M. (2024). Achieving a representative sample in health research. *Nurse Education in Practice*, 78, 103986. <https://doi.org/10.1016/j.nepr.2024.103986>
- Albert, A., Balázs, B., Butkevičienė, E., Mayer, K., & Perelló, J. (2021). Citizen Social Science: New and Established Approaches to Participation in Social Research. In *The Science of Citizen Science* (pp. 119–138). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_7
- Amgain, N. R., Xu, N., Rabbany, A., Fan, Y., & Bhadha, J. H. (2022). Developing soil health scoring indices based on a comprehensive database under different land management practices in Florida. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 5(3). <https://doi.org/10.1002/agg2.20304>
- Amundson, R. (2020). The policy challenges to managing global soil resources. *Geoderma* 379, 114639. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114639>.
- Andrade, C. (2020). The Limitations of Online Surveys. *Indian Journal of Psychological Medicine*, 42(6), 575–576. <https://doi.org/10.1177/0253717620957496>
- Antoni, V., & Kraszewski, M. (2018). L'état des sols en France : l'artificialisation et les autres sources de dégradation. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 91, 13-18. <https://doi.org/10.3917/re1.091.0013>
- Aqeel, M., Jamil, M., & Yusoff, I. (2014). Soil contamination, risk assessment and remediation. In *Environmental risk assessment of soil contamination*. InTech. <https://doi.org/10.5772/57287>
- Arias-Navarro, C., Panagos, P., Jones, A., Amaral, M. J., Schneegans, A., van Liedekerke, M., Wojda, P., & Montanarella, L. (2023). Forty years of soil research funded by the European Commission: Trends and future. A systematic review of research projects. *European Journal of Soil Science*, 74(5). <https://doi.org/10.1111/ejss.13423>
- Arrouays, D., Saby, N.P.A., Thioulouse, J., Jolivet, C., Boulonne, L., & Ratié, C. (2011). Large trends in French topsoil characteristics are revealed by spatially constrained multivariate analysis. *Geoderma*, 161(3–4), 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.002>
- Arrouays, D., Thorette, J., Feix, I., Lesaffre, B., & Stengel, P. (2021). La naissance du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 49–56.
- Arrouays, D., & Dawson, L. (2022). Soil priorities around the world - an introduction. *Geoderma Regional*, 30, e00555. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00555>
- Askallo GmbH (Version 2022.6). Yasemin Thies, Karlsruhe, Germany. URL: <https://www.askallo.de/>
- Atlas of Living Australia (n.d.). Available at: www.ala.org.au [Last accessed 5 June 2023]

- Austruy, A., Dron, J., Charbonnier, E., Babaguela, N., Miche, H., Keller, C., & Chamaret, P. (2016). Teneurs naturelles et apports anthropiques en éléments traces dans les sols à l'ouest de l'étang de Berre. *Etude et Gestion des Sols*, 23, 125-141
- Aviso, K. B., Sy, C. L., Tan, R. R., & Ubando, A. T. (2020). Fuzzy optimization of carbon management networks based on direct and indirect biomass co-firing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110035. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110035>
- Bagnall, D. K., Morgan, C. L. S., Cope, M., Bean, G. M., Cappellazzi, S., Greub, K., Liptzin, D., Norris, C. L., Rieke, E., Tracy, P., Aberle, E., Ashworth, A., Bañuelos Tavarez, O., Bary, A., Baumhardt, R. L., Borbón Gracia, A., Brainard, D., Brennan, J., Briones Reyes, D., & Honeycutt, C. W. (2022). Carbon-sensitive pedotransfer functions for plant available water. *Soil Science Society of America Journal*, 86(3), 612–629. <https://doi.org/10.1002/saj2.20395>
- Balázs, B., Mooney, P., Nováková, E., Bastin, L., & Jokar Arsanjani, J. (2021). Data Quality in Citizen Science. In: Vohland K., A. Land-Zandstra, L. Ceccaroni, R. Lemmens, J. Perelló, M. Ponti, R. Samson, & K. Wagenknecht (Eds.), *The Science of Citizen Science* (pp. 139-157). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_8
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, 25(4), 335–345. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
- Baumhardt, R., Stewart, B., & Sainju, U. (2015). North American Soil Degradation: Processes, Practices, and Mitigating Strategies. *Sustainability*, 7(3), 2936–2960. <https://doi.org/10.3390/su7032936>
- BDAT (n.d.). Available at: www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-danalyses-des-terres-bdat-62.gissol.fr [Last accessed 25 May 2024]
- Bilotta, G.S., Brazier, R.E., & Haygarth, P.M. (2007). The Impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands (pp. 237–280). [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)94006-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)94006-1)
- Bispo, A., Arrouays, D., Saby, N., Boulonne, L., & Fantappiè, M. (2021). Proposal of methodological development for the LUCAS programme in accordance with national monitoring programmes. Deliverable 6.3. EJP SOIL. Available at : https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_Deliverable_6.3_Dec_2021_final.pdf [Last accessed 22 February 2024]
- Bispo, A., Fantappiè, M., van Egmond, F., Smreczak, B., Bakacsi, Z., Hessel, R., Wetterlind, J., Siebelec, G., & Jones, A. (2022). A review of existing soil monitoring systems to pave the way for the EU Soil Observatory. *World Congress of Soil Science*, 1-5 août 2022, Glasgow, Royaume Uni
- le Bissonnais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J., & King, D. (2002). Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *CATENA*, 46(2–3), 207–220. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00167-9)
- Blanco-Canqui, H., Ruis, S.J., Holman, J.D., Creech, C.F., & Obour, A.K. (2022). Can cover crops improve soil ecosystem services in water-limited environments? A review. *Soil Science Society of America Journal*, 86(1), 1–18. <https://doi.org/10.1002/saj2.20335>
- BMUV, German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (2019). Bundeskabinett beschließt umfangreiches Aktionsprogramm für den Insektenschutz. Press release 04.09.2019. Available via <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/schulze-wir-koennen-das-insektensterben-stoppen/>. Accessed 26 June 2023

- Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. v., & Shirk, J. (2009). Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *BioScience*, 59(11), 977–984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>
- Bonney, R., Phillips, T. B., Ballard, H. L., & Enck, J. W. (2016). Can citizen science enhance public understanding of science? *Public Understanding of Science*, 25(1), 2–16. <https://doi.org/10.1177/0963662515607406>
- Borrelli, P., Alewell, C., Yang, J.E., Bezak, N., Chen, Y., Fenta, A.A., Fendrich, A.N., Gupta, S., Matthews, F., Modugno, S., Haregeweyn, N., Robinson, D.A., Tan, F., Vanmaercke, M., Verstraeten, G., Vieira, D.C.S., & Panagos, P. (2023). Towards a better understanding of pathways of multiple co-occurring erosion processes on global cropland. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(4), 713–725. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.008>
- Bouma, J., Broll, G., Crane, T.A., Dewitte, O., Gardi, C., Schulte, R.P., & Towers, W. (2012). Soil information in support of policy making and awareness raising. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4 (5), 552–558. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.07.001>.
- Bouma, J. (2019). How to communicate soil expertise more effectively in the information age when aiming at the UN sustainable development goals. *Soil Use Manag.* 35 (1), 32–38. <https://doi.org/10.1111/sum.12415>.
- Bouma, J. (2022). Transforming living labs into lighthouses: a promising policy to achieve land-related sustainable development, *SOIL*, 8, 751–759, <https://doi.org/10.5194/soil-8-751-2022>
- Bowser, A., Wiggins, A., Shanley, L., Preece, J., & Henderson, S. (2014). Sharing data while protecting privacy in citizen science. *Interactions*, 21(1), 70–73. <https://doi.org/10.1145/2540032Bordoloi>, S., & Ng, C.W.W. (2020). The effects of vegetation traits and their stability functions in bio-engineered slopes: A perspective review. *Engineering Geology*, 275, 105742. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105742>
- Brus, D.J., & Saby, N.P.A. (2016). Approximating the variance of estimated means for systematic random sampling, illustrated with data of the French Soil Monitoring Network. *Geoderma*, 279, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.016>
- Bürger schaffen Wissen (n.d.). Available at: www.buergerschaffenwissen.de [Last accessed 5 June 2023]
- Burton, V. J., & Cameron, E. K. (2021). Learning More About Earthworms With Citizen Science. *Frontiers for Young Minds*, 8. <https://doi.org/10.3389/frym.2020.548525>
- Campbell, G.A., Lilly, A., Corstanje, R., Mayr, T.R., & Black, H.I.J. (2017). Are existing soils data meeting the needs of stakeholders in Europe? An analysis of practical use from policy to field. *Land Use Policy* 69, 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.09.016>.
- Cárceles Rodríguez, B., Durán-Zuazo, V.H., Soriano Rodríguez, M., García-Tejero, I.F., Gálvez Ruiz, B., & Cuadros Tavira, S. (2022). Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. *Soil Systems*, 6(4), 87. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040087>
- Caubet, M., Román Dobarco, M., Arrouays, D., Minasny, B., & Saby, N.P.A. (2019). Merging country, continental and global predictions of soil texture: Lessons from ensemble modelling in France, *Geoderma*, Volume 337, 2019, Pages 99–110, ISSN 0016-7061
- CCME - Canadian Council of Ministers of the Environment (2010). Canadian soil quality guidelines for carcinogenic and other polycyclic aromatic hydrocarbons (Environmental and human health effects). Scientific criteria document (revised). 216 pp.
- Ceccaroni, L., Olivier, J., Roger, E., Bibby, J., Flemons P., Michael K., & Joly, A. (2023). Advancing the productivity of science with citizen science and artificial intelligence. In: *Artificial Intelligence in Science : Challenges, Opportunities and the Future of Research*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/69563b12-en>.

- Cendrero, A., Forte, L. M., Remondo, J., & Cuesta-Albertos, J. A. (2020). Anthropocene Geomorphic Change. Climate or Human Activities? Earth's Future, 8(5). <https://doi.org/10.1029/2019EF001305>
- Cerema (2022). L'artificialisation et ses déterminants d'après les fichiers fonciers, 2009-2021. Available at: <https://cerema.app.box.com/v/pnb-action7-indicateurs-ff/file/985877140947> [Last accessed 15 April 2023]
- Chataut, G., Bhatta, B., Joshi, D., Subedi, K., & Kafle, K. (2023). Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. Journal of Agriculture and Food Research, 11, 100533. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100533>
- Chen, S., Richer-de-Forges, A.C., Saby, N.P.A., Martin, M.P., Walter, C., & Arrouays, D. (2018). Building a pedotransfer function for soil bulk density on regional dataset and testing its validity over a larger area. Geoderma, 312, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.009>
- Chen, S., Arrouays, D., Angers, D.A., Martin, M.P., & Walter, C. (2019). Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept. Soil and Tillage Research, 188, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.001>
- Chen, S., Mulder, V.L., Heuvelink, G.B.M., Poggio, L., Caubet, M., Román Dobarco, M., Walter, C., & Arrouays, D. (2020). Model averaging for mapping topsoil organic carbon in France. Geoderma, 366, 114237. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114237>
- Chiang, F., Mazdiyasni, O., & AghaKouchak, A. (2018). Amplified warming of droughts in southern United States in observations and model simulations. Science Advances, 4(8). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2380>
- Christel, A., Maron, P.A., & Ranjard, L. (2021). Impact of farming systems on soil ecological quality: a meta-analysis. Environmental Chemistry Letters, 19(6), 4603–4625. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01302-y>
- CIRCASA, 2017. Deliverable D2.3: “Synthesis report on knowledge demands and needs of stakeholders”. In: Frelih-Larsen, A., Ittner, S., Herb, I., Tarpey, J., Olesen, E.J., Graversgaard, M., Claessens, L., Eموke Madari, B., Razafimbelo, T., Kontoboytseva, A., Nciizah, A., Swanepoel, C., Katto, C., Verchot, L., Baldock, J., Grundy, M., Hongmin, D., Li, Y., Mc Neill, S., Arias-Navarro, C., Soussana, J.F., Tran, T.M., Jouquet, P., Demenois, J. (Eds.), European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme grant agreement N° 774378. Coordination of International Research Cooperation on soil CARbon Sequestration in Agriculture. <https://doi.org/10.15454/Q0XVVD>.
- 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. European Journal of Soil Biology, 49, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.003>
- Colsaet, A., Laurans, Y., & Levrel, H. (2018). What drives land take and urban land expansion? A systematic review. Land Use Policy, 79, 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.017>
- Concepción, E. D., Obrist, M. K., Moretti, M., Altermatt, F., Baur, B., & Nobis, M.P. (2016). Impacts of urban sprawl on species richness of plants, butterflies, gastropods and birds: not only built-up area matters. Urban Ecosystems, 19(1), 225–242. <https://doi.org/10.1007/s11252-015-0474-4>
- Connor Desai, S., & Reimers, S. (2019). Comparing the use of open and closed questions for Web-based measures of the continued-influence effect. Behavior Research Methods, 51(3), 1426–1440. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1066-z>

- Cooper, C. B., Rasmussen, L. M., & Jones, E. D. (2021). Perspective: The Power (Dynamics) of Open Data in Citizen Science. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.637037>
- Cornu, S., Keesstra, S., Bispo, A., Fantappie, M., van Egmond, F., Smreczak, B., Wawer, R., Pavlů, L., Sobocká, J., Bakacsi, Z., Farkas-Iványi, K., Molnár, S., Møller, A. B., Madenoglu, S., Feiziene, D., Oorts, K., Schneider, F., da Conceição Gonçalves, M., Mano, R., Garland, G., Skalský, R., O'Sullivan, L., Kasparinskis, R., & Chenu, C. (2023). National soil data in EU countries, where do we stand? *European Journal of Soil Science*, 74(4). <https://doi.org/10.1111/ejss.13398>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.v., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Criscuolo, L., L'Astorina, A., Van der Wal, R., & Gray, L. C. (2023). Recent contributions of citizen science on sustainability policies: A critical review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 31, 100423. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100423>
- Daebeler, A., Petrová, E., Kinz, E., Grausenburger, S., Berthold, H., Sandén, T., & Angel, R. (2022). Pairing litter decomposition with microbial community structures using the Tea Bag Index (TBI). *SOIL*, 8(1), 163–176. <https://doi.org/10.5194/soil-8-163-2022>
- Dalkir, K. (2005). *Knowledge Management in Theory and Practice*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080547367>.
- Delmas, M., Saby, N., Arrouays, D., Dupas, R., Lemerrier, B., Pellerin, S., & Gascuel-Oudoux, C. (2015). Explaining and mapping total phosphorus content in French topsoils. *Soil Use and Management*, 31(2), 259–269. <https://doi.org/10.1111/sum.12192>
- De Vries, M., Land-Zandstra, A., & Smeets, I. (2019). Citizen Scientists' Preferences for Communication of Scientific Output: A Literature Review. *Citizen Science: Theory and Practice*, 4(1). <https://doi.org/10.5334/cstp.136>
- Dockès, A.-C., Chauvat, S., Correa, P., Turlot, A., & Nettle, R. (2019). Advice and advisory roles about work on farms. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0547-x>
- Dollinger, J., & Jose, S. (2018). Agroforestry for soil health. *Agroforestry Systems*, 92(2), 213–219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858–1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
- Dominati, E., Mackay, A., Green, S., & Patterson, M. (2014). A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. *Ecological Economics*, 100, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008>
- Drewry, J.J., Cameron, K.C., & Buchan, G.D. (2008). Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing - a review. *Soil Research*, 46(3), 237. <https://doi.org/10.1071/SR07125>
- Druschke, C. G., & Seltzer, C. E. (2012). Failures of Engagement: Lessons Learned from a Citizen Science Pilot Study. *Applied Environmental Education & Communication*, 11(3–4), 178–188. <https://doi.org/10.1080/1533015X.2012.777224>
- ECSA (European Citizen Science Association) (2015). *Ten Principles of Citizen Science*. Berlin. <http://doi.org/10.17605/OSF.IO/XPR2N>

- Eekhout, J.P.C., & de Vente, J. (2022). Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. *Earth-Science Reviews*, 226, 103921. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103921>
- Ekström, B. (2023). Thousands of examining eyes: credibility, authority and validity in biodiversity citizen science data production. *Aslib Journal of Information Management*, 75(1), 149–170. <https://doi.org/10.1108/AJIM-10-2021-0292>
- El Akkari, M., Sandoval, M., le Perchec, S., & Réchauchère, O. (2018). Textual Analysis of Published Research Articles on the Environmental Impacts of Land-Use Change (pp. 15–38). https://doi.org/10.1007/978-3-319-96289-4_2
- van den Elsen, E., Antón, R., Cousin, I., Fuchs, L., de Haan, J., Teuling, K., Klimkiewicz-Pawlas, A., Niedźwiecki, J., Pindral, S., Montagne, D., Scammacca, O., & Weninger, T. (2022). A framework to assess soil threats, soil functions and soil-based ecosystem services. *EJP Soil – SERENA D2.1*.
- Esparza Robles, U.R. (2021). Challenges and opportunities for climate-smart agricultural soil management – a global survey. Master thesis. Available at: https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/003/013/849/RUG01-003013849_2021_0001_AC.pdf [Last accessed 25 February 2024]
- EU-Citizen.Science (n.d.). Available at: eu-citizen.science [Last accessed 5 June 2023]
- European Commission (2016). Open innovation, open science, open to the world – A vision for Europe. Luxembourg: Publications Office of the EU.
- European Commission (2017). OSPP-REC: Open science policy platform recommendations. Luxembourg: Publications Office of the EU.
- European Commission (2021a). EU Soil Strategy for 2030. Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate. 26 pages COM (2021) 699 final <https://data.europa.eu/doi/10.2830/530561>
- European Commission (2021b). Horizon Europe, open science – Early knowledge and data sharing, and open collaboration, Publications Office of the European Union, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/18252>
- European Commission (2021c). A Soil Deal for Europe: 100 Living Labs and Lighthouses to lead the transition towards healthy soils by 2030. Implementation Plan. Directorate-General for Research and Innovation, European Commission. Internal working document of the European Commission.
- European Commission (2023). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). 69 pages COM (2023) 416 final.
- European Environmental Agency (2023). Soil monitoring in Europe – Indicators and thresholds for soil health assessments. Periodical European Environment Agency EEA. Report No. 08/2022, 181. <https://doi.org/10.2800/956606>
- EUROSTAT (2018). Land cover and use. Microdata. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/lucas/database/2018> [Last accessed 25 February 2024]
- EUSO soil health dashboard (2023). EU Soil Observatory. Available at: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard/> (accessed 10 May 2023)
- Faber, J.H., Cousin, I., Meurer, K.H.E., Hendriks, C.M.J., Bispo, A., Viketoft, M., ten Damme, L., Montagne, D., Hanegraaf, M.C, Gillikin, A., Kuikman, P., Obiang-Ndong, G., Bengtsson, J., & Taylor, A. (2022). Stocktaking for agricultural soil quality and ecosystem services indicators and their reference values. *EJP SOIL Internal Project SIREN Deliverable 2. Report*, 153 pp

- Fantappiè, M., Peruginelli, G., Conti, S., Rennes, S., van Egmond F., & Le Bas, C. (2021). Report on national and EU regulations on agricultural soil data sharing. Deliverable 6.2. EJP SOIL. Available at : https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_D6.2_Report_on_national_and_EU_regulations_on_agricultural_soil_data_sharing_v2.pdf [Last accessed 22 February 2024]
- FAO/ECE (1994). International workshop on harmonisation of soil conservation monitoring systems. In FAO-FAO/ECE-RISSAC, 14–17 September 1994 (p. 224). Hungary.
- FAO & ITPS (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy
- FAO, ITPS, GSBI, CBD & EC (2020). State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities, Report 2020. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
- FAO, WFP & IFAD (2012). The State of Food Insecurity in the World 2012. Economic growth is necessary but not sufficient to accelerate reduction of hunger and malnutrition. Rome, FAO
- Feliciano, D., Hunter, C., Slee, B., & Smith, P. (2014). Climate change mitigation options in the rural land use sector: Stakeholders' perspectives on barriers, enablers and the role of policy in North East Scotland. *Environmental Science & Policy*, 44, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.07.010>
- Feo, E., Burssens, S., Mareen, H., & Spanoghe, P. (2022). Shedding light into the need of knowledge sharing in H2020 thematic networks for the agriculture and forestry innovation. *Sustainability* 14 (7), 3951. <https://doi.org/10.3390/su14073951>.
- Fernandez-Ugalde, O., Scarpa, S., Orgiazzi, A., Panagos, P., Van Liedekerke, M., Marechal A., & Jones, A. (2022). LUCAS 2018 Soil Module. Presentation of dataset and results. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Ferreira, C. S. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., & Kalantari, Z. (2022). Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of The Total Environment*, 805, 150106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106>
- Fine, A. K., van Es, H. M., & Schindelbeck, R. R. (2017). Statistics, Scoring Functions, and Regional Analysis of a Comprehensive Soil Health Database. *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 589–601. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.09.0286>
- Follett, R., & Strezov, V. (2015). An Analysis of Citizen Science Based Research: Usage and Publication Patterns. *PLOS ONE*, 10(11), e0143687. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143687>
- Forrester, T. D., Baker, M., Costello, R., Kays, R., Parsons, A. W., & McShea, W. J. (2017). Creating advocates for mammal conservation through citizen science. *Biological Conservation*, 208, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.06.025>
- Fraisl, D., Campbell, J., See, L., Wehn, U., Wardlaw, J., Gold, M., Moorthy, I., Arias, R., Piera, J., Oliver, J. L., Masó, J., Penker, M., & Fritz, S. (2020). Mapping citizen science contributions to the UN sustainable development goals. *Sustainability Science*, 15(6), 1735–1751. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00833-7>
- Fraisl, D., Hager, G., Bedessem, B., Gold, M., Hsing, P.-Y., Danielsen, F., Hitchcock, C. B., Hulbert, J. M., Piera, J., Spiers, H., Thiel, M., & Haklay, M. (2022). Citizen science in environmental and ecological sciences. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 64. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00144-4>
- Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., Salomonsson, L., Helenius, J., Rickerl, D., Salvador, R., Wiedenhoeft, M., Simmons, S., Allen, P., Altieri, M.,

- Flora, C., & Poincelot, R. (2003). Agroecology: The Ecology of Food Systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 22(3), 99–118. https://doi.org/10.1300/J064v22n03_10
- Frelüh-Larsen, A., Hinzmann, M., & Ittner, S. (2018). The ‘Invisible’ Subsoil: An Exploratory View of Societal Acceptance of Subsoil Management in Germany. *Sustainability*, 10(9), 3006. <https://doi.org/10.3390/su10093006>
- Froger, C., Saby, N.P.A., Jolivet, C.C., Boulonne, L., Caria, G., Freulon, X., de Fouquet, C., Roussel, H., Marot, F., & Bispo, A. (2021). Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. *SOIL*, 7(1), 161–178. <https://doi.org/10.5194/soil-7-161-2021>
- Froger, C., Jolivet, C., Budzinski, H., Pierdet, M., Caria, G., Saby, N.P.A., Arrouays, D., & Bispo, A. (2023). Pesticide residues in French soils: occurrence, risks, and persistence. *Environmental Science & Technology*, 57(20), 7818–7827. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09591>
- Froger, C., Tondini, E., Arrouays, D., Oorts, K., Poeplau, C., Wetterlind, J., Putku, E., Saby, N. P. A., Fantappiè, M., Styc, Q., Chenu, C., Salomez, J., Callewaert, S., Vanwindekens, F. M., Huyghebaert, B., Herinckx, J., Heilek, S., Sofie Harbo, L., de Carvalho Gomes, L., Lázaro-López, A., Rodriguez, J.A., Pindral, S., Smreczak, B., Benó, A., Bakacsi, Z., Teuling, K., van Egmond, F., Hutár, V., Pálka, B., Abrahám, D., & Bispo, A. (2024). Comparing LUCAS Soil and national systems: Towards a harmonized European Soil monitoring network. *Geoderma*, 449, 117027. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117027>
- Gauthier, M., Hogue, R., D’Astous-Pagé, J., Champagne, M., & Halde, C. (2023). Developing scoring functions based on soil texture to assess agricultural soil health in Quebec, Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 103(4), 618–633. <https://doi.org/10.1139/cjss-2022-0116>
- Gardi, C., Panagos, P., van Liedekerke, M., Bosco, C., & de Brogniez, D. (2015). Land take and food security: assessment of land take on the agricultural production in Europe. *Journal of Environmental Planning and Management*, 58(5), 898–912. <https://doi.org/10.1080/09640568.2014.899490>
- Gascuel, C., Loiseau-Dubosc, P., Auclerc, A., Bougon, N., Caquet, T., Lerouyer, V., Pierart, A., Ranjard, L., Resche-Rigon, F., Roturier, C., Sauter, J., & Serin, L. (2023). Sols, sciences et recherches participatives : comment consolider et fédérer le foisonnement d’initiatives en France ? *Nature Sciences et Sociétés*. <https://doi.org/10.1051/nss/2023014>
- Gensburg, L. J., Pantea, C., Fitzgerald, E., Stark, A., Hwang, S.-A., & Kim, N. (2009). Mortality among Former Love Canal Residents. *Environmental Health Perspectives*, 117(2), 209–216. <https://doi.org/10.1289/ehp.11350>
- Gerzabek, M. (2014). Global soil use in biomass production: Opportunities and challenges of ecological and sustainable intensification in agriculture. *Bodenkultur*. 65. 5-15. ISSN 0006-5471
- Giraudoux, P (2023). *_pgirmess: Spatial Analysis and Data Mining for Field Ecologists_*. R package version 2.0.2, <<https://CRAN.R-project.org/package=pgirmess>>.
- GIS SOL (n.d.). Available at: www.gissol.fr [Last accessed 25 May 2024]
- GIS SOL (2011). *L’état des sols de France*. Groupement d’intérêt scientifique sur les sols, 188 p.
- Gosnell, H., Gill, N., & Voyer, M. (2019). Transformational adaptation on the farm: Processes of change and persistence in transitions to ‘climate-smart’ regenerative agriculture. *Global Environmental Change*, 59, 101965. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101965>
- Grinand, C., Barthès, B.G., Brunet, D., Kouakoua, E., Arrouays, D., Jolivet, C., Caria, G., & Bernoux, M. (2012). Prediction of soil organic and inorganic carbon contents at a national scale (France) using mid-infrared reflectance spectroscopy (MIRS). *European Journal of Soil Science*, 63(2), 141–151. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01429.x>

- de Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Groves, R.M., Cialdini, R.B., & Couper, M.P. (1992). Understanding the decision to participate in a survey. *Public Opinion Quarterly*, Volume 56, Issue 4, 475–495, <https://doi.org/10.1086/269338>
- Guigue, J., Lévêque, J., Mathieu, O., Schmitt-Kopplin, P., Lucio, M., Arrouays, D., Jolivet, C., Dequiedt, S., Chemidlin Prévost-Bouré, N., & Ranjard, L. (2015). Water-extractable organic matter linked to soil physico-chemistry and microbiology at the regional scale. *Soil Biology and Biochemistry*, 84, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.016>
- Haklay, M., Dörler, D., Heigl, F., Manzoni, M., Hecker, S., & Vohland, K. (2021). What Is Citizen Science? The Challenges of Definition. In: Vohland, K., et al. *The Science of Citizen Science*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_2
- Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörren, T., Goulson, D., & De Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE*, 12(10), e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>
- Hamidov, A., Helming, K., Bellocchi, G., Bojar, W., Dalgaard, T., Ghaley, B. B., Hoffmann, C., Holman, I., Holzkämper, A., Krzeminska, D., Kvaernø, S. H., Lehtonen, H., Niedrist, G., Øygarden, L., Reidsma, P., Roggero, P. P., Rusu, T., Santos, C., Seddaiu, G., Skarbovik, E., Ventrella, D., Zarski J., & Schönhart, M. (2018). Impacts of climate change adaptation options on soil functions: A review of European case-studies. *Land Degradation & Development*, 29(8), 2378–2389. <https://doi.org/10.1002/ldr.3006>
- Hansen, B., & Bonney, P. (2022). Learning from successful long-term citizen science programs. *Pacific Conservation Biology*. <https://doi.org/10.1071/PC21065>
- Head, J.S., Crockatt, M.E., Didarali, Z., Woodward, M.J., & Emmett, B.A. (2020). The Role of Citizen Science in Meeting SDG Targets around Soil Health. *Sustainability*, 12(24), 10254. <https://doi.org/10.3390/su122410254>
- Hecker, S., & Taddicken, M. (2022). Deconstructing citizen science: a framework on communication and interaction using the concept of roles. *Journal of Science Communication*, 21(01), A07. <https://doi.org/10.22323/2.21010207>
- Heigl, F., Kieslinger, B., Paul, K. T., Uhlik, J., & Dörler, D. (2019). Toward an international definition of citizen science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(17), 8089–8092. <https://doi.org/10.1073/pnas.1903393116>
- Heller, O., Peter, N., Garland, G., & Weiskopf, P., (2021). Switzerland’s EJP SOIL Stocktake: Tasks 2.1, 2.2 and 2.3. *Agroscope Science* 117, 1–92. <https://doi.org/10.34776/as117e>.
- Heller, O., Bene, C. di Nino, P., Huyghebaert, B., Arlauskienė, A., Castanheira, N.L., Higgins, S., Horel, A., Kir, A., Kizeková, M., Lacoste, M., Munkholm, L.J., O’Sullivan, L., Radzikowski, P., Rodríguez-Cruz, M.S., Sandén, T., Šarūnaitė, L., Seidel, F., Spiegel, H., Stalenga, J., Uusi-Kämpä, J., Vervuurt, W., Keller, T., & Vanwindekens, F. (2024). Towards enhanced adoption of soil-improving management practices in Europe. *European Journal of Soil Science*, 75(2). <https://doi.org/10.1111/ejss.13483>
- Helming, K., Daedlow, K., Hansjürgens, B., & Koellner, T. (2018a). Assessment and Governance of Sustainable Soil Management. *Sustainability*, 10(12), 4432. <https://doi.org/10.3390/su10124432>
- Helming, K., Daedlow, K., Paul, C., Techen, A.-K., Bartke, S., Bartkowski, B., Kaiser, D., Wollschläger, U., & Vogel, H.-J. (2018b). Managing soil functions for a sustainable

- bioeconomy-Assessment framework and state of the art. *Land Degradation & Development*, 29(9), 3112–3126. <https://doi.org/10.1002/ldr.3066>
- Hessel, R., Wyseure, G., Panagea, I.S., Alaoui, A., Reed, M.S., van Delden, H., Muro, M., Mills, J., Oenema, O., Areal, F., van den Elsen, E., Verzandvoort, S., Assinck, F., Elsen, A., Lipiec, J., Koutroulis, A., O’Sullivan, L., Bolinder, M.A., Fleskens, L., & Chivers, C.A. (2022). Soil-Improving Cropping Systems for Sustainable and Profitable Farming in Europe. *Land* 11 (6), 780. <https://doi.org/10.3390/land11060780>.
- Hewitt, A., Dominati, E., Webb, T., & Cuthill, T. (2015). Soil natural capital quantification by the stock adequacy method. *Geoderma*, 241–242, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.014>
- Hijbeek, R., Cormont, A., Hazeu, G., Bechini, L., Zavattaro, L., Janssen, B., Werner, M., Schlatter, N., Guzmán, G., Bijttebier, J., Pronk, A.A., van Eupen, M., & van Ittersum, M.K. (2017). Do farmers perceive a deficiency of soil organic matter? A European and farm level analysis. *Ecological Indicators*, 83, 390–403. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.023>
- Holzer, J. M., & Orenstein, D. E. (2023). Organizational transformation for greater sustainability impact: recent changes in a scientific research infrastructure in Europe. *Landscape Ecology*. <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01624-y>
- Hou, D. (2020a). Knowledge sharing and adoption behaviour: An imperative to promote sustainable soil use and management. *Soil Use Manage.*, 36: 557-560. <https://doi.org/10.1111/sum.12648>
- Hou, D., Bolan, N.S., Tsang, D.C.W., Kirkham, M.B., & O’Connor, D. (2020b). Sustainable soil use and management: an interdisciplinary and systematic approach. *Sci. Total Environ.* 729, 138961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138961>.
- Houšková, B., & Montanarella, L. (2008). The natural susceptibility of European soils to compaction. in: Tóth, G., Montanarella, L., & Rusco, E. (eds.) *Threats to soil quality in Europe*. EUR 23438 EN, Office for official publications of the European communities, Luxembourg. <https://doi.org/10.2788/8647>
- Hubble, T., Clarke, S., Stokes, A., & Phillips, C. (2017). 4th International Conference on soil bio- and eco-engineering (SBEE2016) ‘The Use of Vegetation to Improve Slope Stability.’ *Ecological Engineering*, 109, 141–144. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.11.003>
- Huber, S., Prokop, G., Arrouays, D., Banko, G., Bispo, A., Jones, R.J.A., Kibblewhite, M.G., Lexer, W., Möller, A., Rickson, R.J., Shishkov, T., Stephens, M., Tóth, G., van den Akker, J.J.H., Varallyay, G., Verheijen, F.G.A., & Jones, A.R. (eds) (2008). *Environmental assessment of soil for monitoring: Volume I indicators and criteria*. EUR 23490 EN/1, Office for the official publications of the European communities, Luxembourg, 339pp
- Iedereen Wetenschapper (n.d.). Available at: www.iedereenwetenschapper.be [Last accessed 5 June 2023]
- INSPIRE (2013). *Infrastructure for Spatial Information in Europe*. Available at: https://inspire.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_SO_v3.0.pdf [Last accessed 9 October 2023]
- IPES-Food (2016). *From uniformity to diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems*. International Panel of Experts on Sustainable Food systems. Available at: https://www.ipes-food.org/_img/upload/files/UniformityToDiversity_FULL.pdf [Last accessed 15 November 2023]
- Jalabert, S.S.M., Martin, M.P., Renaud, J.-P., Boulonne, L., Jolivet, C., Montanarella, L., & Arrouays, D. (2010). Estimating forest soil bulk density using boosted regression modelling. *Soil Use and Management*, 26(4), 516–528. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00305.x>

- Jaworski, C. C., Krzywoszynska, A., Leake, J. R., & Dicks, L. v. (2024). Sustainable soil management in the United Kingdom: A survey of current practices and how they relate to the principles of regenerative agriculture. *Soil Use and Management*, 40(1). <https://doi.org/10.1111/sum.12908>
- Jolivet, C., Boulonne, L., & Ratié, C. (2006). *Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols*, édition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p. (hal-02818011)
- Jolivet, C., Almeida-Falcon, J.-L., Berché, P., Boulonne, L., Fontaine, M., Gouny, L., Lehmann, S., Maître, B., Ratié, C., Schellenberger, E., & Soler-Dominguez, N. (2018). *Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine, 2016 – 2027, Version 3*, INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France
- Jolivet, C., Almeida Falcon, J.L., Berché, P., Boulonne, L., Fontaine, M., Gouny, L., Lehmann, S., Maître, B., Ratié, C., Schellenberger, E., & Soler-Dominguez, N. (2022). French Soil Quality Monitoring Network Manual RMQS2: second metropolitan campaign 2016–2027. 2-7380-1451-8. <https://dx.doi.org/10.17180/KC64-NY88>
- Jones, T., Baxter, M., & Khanduja, V. (2013). A quick guide to survey research. *The Annals of The Royal College of Surgeons of England*, 95(1), 5–7. <https://doi.org/10.1308/003588413X13511609956372>
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- JRC (2023). EUSO soil health dashboard. EU Soil Observatory. Available at: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dash-board/> [Last accessed 25 May 2024]
- Kabała, C., Muszyfaga, E., Gałka, B., Łabuńska, D., & Mańczyńska, P. (2016). Conversion of Soil pH 1:2.5 KCl and 1:2.5 H₂O to 1:5 H₂O: Conclusions for Soil Management, Environmental Monitoring, and International Soil Databases. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(2), 647–653. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61549>
- Kania, J., & Zmija, J. (2016). Changes in agricultural knowledge and information systems: case study of Poland. *Visegrad J. Bioecon. Sustain. Developm.* 5 (1), 10–17. <https://doi.org/10.1515/vjbsd-2016-0002>.
- 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., Bouré, N.C.P., & Ranjard, L. (2018). Biogeography of soil bacteria and archaea across France. *Science Advances*, 4(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1808>
- Karimi, B., Dequiedt, S., Terrat, S., Jolivet, C., Arrouays, D., Wincker, P., Cruaud, C., Bispo, A., Chemidlin Prévost-Bouré, N., & Ranjard, L. (2019). Biogeography of Soil Bacterial Networks along a Gradient of Cropping Intensity. *Scientific Reports*, 9(1), 3812. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40422-y>
- Karimi, B., Cahurel, J.-Y., Gontier, L., Charlier, L., Chovelon, M., Mahé, H., & Ranjard, L. (2020a). A meta-analysis of the ecotoxicological impact of viticultural practices on soil biodiversity. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 1947–1966. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01050-5>
- Karimi, B., Villerd, J., Dequiedt, S., Terrat, S., Chemidlin-Prévost Bouré, N., Djemiel, C., Lelièvre, M., Tripied, J., Nowak, V., Saby, N.P.A., Bispo, A., Jolivet, C., Arrouays, D., Wincker, P., Cruaud, C., & Ranjard, L. (2020b). Biogeography of soil microbial habitats across France. *Global Ecology and Biogeography*, 29(8), 1399–1411. <https://doi.org/10.1111/geb.13118>
- Kedzierski, M., Cirederf-Boulant, D., Palazot, M., Yvin, M., & Bruzard, S. (2023). Continents of plastics: an estimate of the stock of microplastics in agricultural soils. *Science of The Total Environment*, Volume 880. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163294>

- Keesstra, S. D., Jacobs, A., Piuccini, C., Fornara, D., Mason, E., Vanwindekens, F. V., Bøe, F., Siebielec, G. S., Fohrafellner, J., Meurer, K., & Vervuurt, W. (2021). Towards climate-smart sustainable management of agricultural soils : Deliverable 2.7 Report on the current availability and use of soil knowledge. <https://doi.org/10.18174/563850>
- Kelly, A.C., & Anderson, C.L. (2016). Comparing farmer and measured assessments of soil quality in Tanzania: Do they align? *Journal of Natural Resources and Development*, 6, 55–65. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v6i0.06>
- Key, G., Whitfield, M.G., Cooper, J., de Vries, F.T., Collison, M., Dedousis, T., Heathcote, R., Roth, B., Mohammed, S., Molyneux, A., van der Putten, W.H., Dicks, L.v., Sutherland, W.J., & Bardgett, R.D. (2016). Knowledge needs, available practices, and future challenges in agricultural soils. *SOIL* 2 (4), 511–521. <https://doi.org/10.5194/soil-2-511-2016>.
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685–701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Kibblewhite, M.G. (2012). Definition of priority areas for soil protection at a continental scale. *Soil Use and Management*, 28(1), 128–133. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00375.x>
- Kosmala, M., Wiggins, A., Swanson, A., & Simmons, B. (2016). Assessing data quality in citizen science. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(10), 551–560. <https://doi.org/10.1002/fee.1436>
- Lacarbe, E., Saby, N.P.A., Martin, M.P., Marchant, B.P., Boulonne, L., Meersmans, J., Jolivet, C., Bispo, A., & Arrouays, D. (2012). Mapping soil Pb stocks and availability in mainland France combining regression trees with robust geostatistics. *Geoderma*, 170, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.014>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lal, R., Bouma, J., Brevik, E., Dawson, L., Field, D.J., Glaser, B., Hatano, R., Hartemink, A.E., Kosaki, T., Lascelles, B., Monger, C., Muggler, C., Ndzana, G.M., Norra, S., Pan, X., Paradelo, R., Reyes-Sanchez, L.B., Sanden, T., Singh, B.R., Spiegel, H., Yanai, J., & Zhang, J. (2021). Soils and sustainable development goals of the United Nations: an International Union of Soil Sciences perspective. *Geoderma Regional*. 25, e00398 <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>.
- Lamb, D. (2018). Undertaking large-scale forest restoration to generate ecosystem services. *Restoration Ecology*, 26(4), 657–666. <https://doi.org/10.1111/rec.12706>
- van Leeuwen, J. P., Saby, N. P. A., Jones, A., Louwagie, G., Micheli, E., Rutgers, M., Schulte, R. P. O., Spiegel, H., Toth, G., & Creamer, R. E. (2017). Gap assessment in current soil monitoring networks across Europe for measuring soil functions. *Environmental Research Letters*, 12, 124007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9c5c>
- Lefèbvre, M.P (2010). Spatialisation de modèles de fonctionnement hydromécanique des sols appliquée à la prévision des risques de tassement à l'échelle de la France. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans. Inra, Orléans, 293 p
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Leino, H., & Puumala, E. (2021). What can co-creation do for the citizens? Applying co-creation for the promotion of participation in cities. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 39(4), 781–799. <https://doi.org/10.1177/2399654420957337>

- van der Linden, S. (2014). On the relationship between personal experience, affect and risk perception: The case of climate change. *European Journal of Social Psychology*, 44(5), 430-440. <https://doi.org/10.1002/ejsp.20>
- Liu, H.Y., Dörler, D., Heigl, F., & Grossberndt, S. (2021). Citizen Science Platforms. *The Science of Citizen Science* (pp. 439-459). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_22
- Löbmann, M. T., Maring, L., Prokop, G., Brils, J., Bender, J., Bispo, A., & Helming, K. (2022). Systems knowledge for sustainable soil and land management. *Science of The Total Environment*, 822, 153389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153389>
- Lobry De Bruyn, L., Jenkins, A., & Samson-Liebig, S. (2017). Lessons Learnt: Sharing Soil Knowledge to Improve Land Management and Sustainable Soil Use. *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 427–438. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.12.0403>
- Lohr, S. L. (2021). Sampling, design and analysis. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429298899>
- Louis, B.P., Saby, N.P.A., Orton, T.G., Lacarce, E., Boulonne, L., Jolivet, C., Ratié, C., & Arrouays, D. (2014). Statistical sampling design impact on predictive quality of harmonization functions between soil monitoring networks. *Geoderma*, 213, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.018>
- MacEwan, R. J., MacEwan, A. S. A., & Toland, A. R. (2017). Engendering Connectivity to Soil Through Aesthetics (pp. 351–363). https://doi.org/10.1007/978-3-319-43394-3_31
- Madureira, H., & Monteiro, A. (2021). Going Green and Going Dense: A Systematic Review of Compatibilities and Conflicts in Urban Research. *Sustainability*, 13(19), 10643. <https://doi.org/10.3390/su131910643>
- Marchant, B.P., Saby, N.P.A., Lark, R.M., Bellamy, P.H., Jolivet, C.C., & Arrouays, D. (2010). Robust analysis of soil properties at the national scale: cadmium content of French soils. *European Journal of Soil Science*, 61(1), 144–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01212.x>
- Marchant, B.P., Saby, N.P.A., Jolivet, C.C., Arrouays, D., & Lark, R.M. (2011). Spatial prediction of soil properties with copulas. *Geoderma*, 162(3–4), 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.03.005>
- Marchant, B.P., Villanneau, E.J., Arrouays, D., Saby, N.P.A., & Rawlins, B.G. (2015). Quantifying and mapping topsoil inorganic carbon concentrations and stocks: approaches tested in France. *Soil Use and Management*, 31(1), 29–38. <https://doi.org/10.1111/sum.12158>
- Marcon, A., Nguyen, G., Rava, M., Braggion, M., Grassi, M., & Zanolin, M.E. (2015). A score for measuring health risk perception in environmental surveys. *Science of The Total Environment*, 527–528, 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.110>
- Maréchal, A., Jones, A., Panagos, P., Belitrandi, D., De Medici, D., De Rosa, D., Martin Jimenez, J., Koeninger, J., Labouyrie, M., Liakos, L., Lugato, E., Matthews, F., Montanarella, L., Muntwyler, A., Orgiazzi, A., Scarpa, S., Schillaci, C., Wojda, P., Van Liedekerke, M., & Simoes Vieira, D. (2022). EU Soil Observatory 2021, EUR 31152 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-55031-0, doi:10.2760/582573, JRC129999
- Martin, M.P., lo Seen, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Nair, K.M., Bourgeon, G., & Arrouays, D. (2009). Optimizing Pedotransfer Functions for Estimating Soil Bulk Density Using Boosted Regression Trees. *Soil Science Society of America Journal*, 73(2), 485–493. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0241>

- Martin, M.P., Wattenbach, M., Smith, P., Meersmans, J., Jolivet, C., Boulonne, L., & Arrouays, D. (2011). Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences*, 8(5), 1053–1065. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1053-2011>
- Martin, M.P., Orton, T.G., Lacarce, E., Meersmans, J., Saby, N.P.A., Paroissien, J.B., Jolivet, C., Boulonne, L., & Arrouays, D. (2014). Evaluation of modelling approaches for predicting the spatial distribution of soil organic carbon stocks at the national scale. *Geoderma*, 223–225, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.005>
- Mason, E., Cornu, S., & Chenu, C. (2023a). Stakeholders' point of view on access to soil knowledge in France. What are the opportunities for further improvement? *Geoderma Regional*, 35, e00716. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00716>
- Mason, E., Löbmann, M., Matt, M., Sharif, I., Maring, L., Ittner, S., Bispo, A. (2023b). Knowledge needs and gaps on soil and land management. Deliverable 2.4. Soil Mission Support. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7695462>
- Mason, E., Bispo, A., Matt, M., Helming, K., Rodriguez, E., Lansac, R., Carrasco, V., Hashar, M. R., Verdonk, L., Prokop, G., Wall, D., Francis, N., Laszlo, P., & Löbmann, M. T. (2023c). Sustainable soil and land management: a systems-oriented overview of scientific literature. *Frontiers in Soil Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1268037>
- Mazumdar, S., Ceccaroni, L., Piera, J., Hölker, F., Berre, A. J., Arlinghaus, R., & Bowser, A. (2018). Citizen science technologies and new opportunities for participation. In *Citizen Science* (pp. 303–320). UCL Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv550cf2.28>
- McBratney, Alex. B., & Hartemink, A. E. (2024). Define soil. *Soil Security*, 14, 100135. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100135>
- McKinney, M.L. (2002). Urbanization, biodiversity, and conservation. *Bioscience* 2002, 52, 883–890
- MEA (2005). *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being 5*. Island Press Washington, DC
- Meersmans, J., Martin, M.P., de Ridder, F., Lacarce, E., Wetterlind, J., de Baets, S., le Bas, C., Louis, B. P., Orton, T.G., Bispo, A., & Arrouays, D. (2012). A novel soil organic C model using climate, soil type and management data at the national scale in France. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(4), 873–888.
- Metzger, M.J., Bunce, R.G.H., Jongman, R.H.G., Múcher, C.A., & Watkins, J.W. (2005). A climatic stratification of the environment of Europe. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 14 (6), 549–563. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2005.00190.x>
- Meurer, K. H. E., Hendriks, C. M. J., Faber, J. H., Kuikman, P. J., van Egmond, F., Garland, G., Putku, E., Barancikova, G., Makovníková, J., Chenu, C., Herrmann, A. M., & Bispo, A. (2024). How does national SOC monitoring on agricultural soils align with the EU strategies? An example using five case studies. *European Journal of Soil Science*, 75(2). <https://doi.org/10.1111/ejss.13477>
- Microsoft (2018). Get started with 3D maps. Microsoft Office Support. Available at: <https://support.office.com/en-us/article/get-started-with-3d-maps-6b56a50d-3c3e-4a9e-a527-eea62a387030> [Last accessed 5 June 2023]
- Minasny, B., McBratney, Alex. B., & Hartemink, A. E. (2010). Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*, 155(3–4), 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.024>
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-

- Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsu, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Mizuta, K., Grunwald, S., Cropper, W. P., & Bacon, A. R. (2021). Developmental History of Soil Concepts from a Scientific Perspective. *Applied Sciences*, 11(9), 4275. <https://doi.org/10.3390/app11094275>
- Mol, G., & Keesstra, S. (2012). Soil science in a changing world. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 473–477. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.013>
- Montanarella, L., Pennock, D.J., McKenzie, N., Badraoui, M., Chude, V., Baptista, I., Mamo, T., Yemefack, M., Singh Aulakh, M., Yagi, K., Young Hong, S., Vijarnsorn, P., Zhang, G.L., Arrouays, D., Black, H., Krasilnikov, P., Sobocká, J., Alegre, J., Henriquez, C.R., de Lourdes Mendonça-Santos, M., Taboada, M., Espinosa-Victoria, D., AlShankiti, A., AlaviPanah, S.K., Elsheikh, E.A.E.M., Hempel, J., Camps Arbestain, M., Nachtergaele, F., & Vargas, R. (2016). World's soils are under threat. *SOIL*, 2, 79–82. <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016>
- Montanarella, L., Scholes, R., & Brainich, A. (2018). The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services: Bonn, Germany
- Morvan, X., Saby, N. P. A., Arrouays, D., le Bas, C., Jones, R. J. A., Verheijen, F. G. A., Bellamy, P. H., Stephens, M., & Kibblewhite, M. G. (2008). Soil monitoring in Europe: A review of existing systems and requirements for harmonisation. *Science of The Total Environment*, 391(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.046>
- MTES - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018. Environnement et agriculture - Les chiffres clés – Edition 2018. Available at: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/datalab-36-environnement-agriculture-les-cc-edition-2018-juin2018.pdf> [Last accessed 5 July 2023].
- Mulder, V.L., Lacoste, M., Richer-de-Forges, A.C., Martin, M.P., & Arrouays, D. (2016). National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. *Geoderma*, 263, 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.035>
- Nascimento, S., Rubio Iglesias, J.M., Owen, R., & Shanley, L. (2018). Citizen science for policy formulation and implementation. In: Hecker, S., Haklay, M., Bowser, A., Makuch, Z., Vogel, J., & Bonn, A. 2018. *Citizen Science: Innovation in Open Science, Society and Policy*. UCL Press, London. <https://doi.org/10.14324/111.9781787352339>
- Naumann, S., Frelih-Larsen, A., Prokop, G., Ittner, S., Reed, M., Mills, J., Morari, F., Verzaandvoort, S., Albrecht, S., Bjurén, A., Siebielec, G., & Miturski, T. (2019). Land Take and Soil Sealing—Drivers, Trends and Policy (Legal) Instruments: Insights from European Cities (pp. 83–112). https://doi.org/10.1007/978-3-030-00758-4_4
- Nord, A., & Snapp, S. (2020). Documentation of farmer perceptions and site-specific properties to improve soil management on smallholder farms in Tanzania. *Land Degradation & Development*, 31(15), 2074–2086. <https://doi.org/10.1002/ldr.3582>
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Geochemistry*, 76(3), 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Okpara, U.T., Fleskens, L., Stringer, L.C., Hessel, R., Bachmann, F., Daliakopoulos, I., Berglund, K., Blanco Velazquez, F.J., Ferro, N.D., Keizer, J., Kohnova, S., Lemann, T., Quinn, C., Schwilch, G., Siebielec, G., Skaalsveen, K., Tibbett, M., & Zoumides, C. (2020). Helping stakeholders select and apply appraisal tools to mitigate soil threats: Researchers' experiences from across Europe. *J. Environ. Manag.* 257, 110005. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110005>

- Oliveira Filho, J. de S. (2020). A bibliometric analysis of soil research in Brazil 1989–2018. *Geoderma Regional*, 23, e00345. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00345>
- OPEN Sciences Participatives (n.d.). Available at: www.open-sciences-participatives.org [Last accessed 5 June 2023]
- Orgiazzi, A., & Panagos, P. (2018). Soil biodiversity and soil erosion: It is time to get married. *Global Ecology and Biogeography*, 27(10), 1155–1167. <https://doi.org/10.1111/geb.12782>
- Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., & Fernández-Ugalde, O. (2018). LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 140–153. <https://doi.org/10.1111/ejss.12499>
- Orton, T.G., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Jolivet, C.C., Villanneau, E.J., Paroissien, J.-B., Marchant, B. P., Caria, G., Barriuso, E., Bispo, A., & Briand, O. (2012). Analyzing the Spatial Distribution of PCB Concentrations in Soils Using Below-Quantification Limit Data. *Journal of Environmental Quality*, 41(6), 1893–1905. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0478>
- Orton, T.G., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Jolivet, C.C., Villanneau, E.J., Marchant, B.P., Caria, G., Barriuso, E., Bispo, A., & Briand, O. (2013). Spatial distribution of Lindane concentration in topsoil across France. *Science of The Total Environment*, 443, 338–350. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.103>
- OST (2021). La position scientifique de la France dans le monde et en Europe, 2005-2018, Hcéres, Paris
- Österreich forscht (n.d.). Available at: www.citizen-science.at [Last accessed 5 June 2023]
- Paek, H.J., & Hove, T. (2024). Mechanisms of climate change media effects: roles of risk perception, negative emotion, and efficacy beliefs. *Health Communication*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/10410236.2024.2324230>
- Panagos, P., Ballabio, C., Scarpa, S., Borrelli, P., Lugato, E., & Montanarella, L. (2020). Soil related indicators to support agri-environmental policies, EUR 30090 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-15644-4, doi:10.2760/011194, JRC119220
- Panagos, P., Montanarella, L., Barbero, M., Schneegans, A., Aguglia, L., & Jones, A. (2022). Soil priorities in the European Union. *Geoderma Regional*, 29, e00510. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00510>
- Panagos, P., Borrelli, P., Jones, A., & Robinson, D. A. (2024). A 1 billion euro mission: A Soil Deal for Europe. *European Journal of Soil Science*, 75(1). <https://doi.org/10.1111/ejss.13466>
- Paul, C., Kuhn, K., Steinhoff-Knopp, B., Weißhuhn, P., & Helming, K. (2021). Towards a standardization of soil-related ecosystem service assessments. *European Journal of Soil Science*, 72(4), 1543–1558. <https://doi.org/10.1111/ejss.13022>
- Paul, C., Bartkowski, B., Dönmez, C., Don, A., Mayer, S., Steffens, M., Weigl, S., Wiesmeier, M., Wolf, A., & Helming, K. (2023). Carbon farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation? *Journal of Environmental Management*, 330, 117142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117142>
- Paroissien, J.-B., Orton, T.G., Saby, N.P.A., Martin, M.P., Jolivet, C.C., Ratie, C., Caria, G., & Arrouays, D. (2012). Mapping black carbon content in topsoils of central France. *Soil Use and Management*, 28(4), 488–496. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00452.x>
- Pellerin, S., Lelievre, V., Arnaud, F., Cécillon, L., Dia, A., Valentin, C. (2019). Regards sur la recherche française en Sciences du sol à partir d'une analyse bibliométrique : points forts, points faibles et tendances récentes. *Étude et Gestion des Sols*, 26 (1), p. 49-63. ISSN 1252-6851.
- Pereira, H. M., Leadley, P. W., Proença, V., Alkemade, R., Scharlemann, J. P. W., Fernandez-Manjarrés, J. F., Araújo, M. B., Balvanera, P., Biggs, R., Cheung, W. W. L., Chini, L., Cooper, H. D.,

- Gilman, E. L., Guénette, S., Hurtt, G. C., Huntington, H. P., Mace, G. M., Oberdorff, T., Revenga, C., ... Walpole, M. (2010). Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. *Science*, 330(6010), 1496–1501. <https://doi.org/10.1126/science.1196624>
- Perelló, J., Klimczuk, A., Land-Zandstra, A., Vohland, K., Wagenknecht, K., Narraway, C., Lemmens, R., & Ponti, M. (2021). The Recent Past and Possible Futures of Citizen Science: Final Remarks. In *The Science of Citizen Science* (pp. 517–529). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_26
- Peroni, F., Pappalardo, S. E., Facchinelli, F., Crescini, E., Munafò, M., Hodgson, M. E., & de Marchi, M. (2022). How to map soil sealing, land take and impervious surfaces? A systematic review. *Environmental Research Letters*, 17(5), 053005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6887>
- Phillips, T., Porticella, N., Conostas, M., & Bonney, R. (2018). A Framework for Articulating and Measuring Individual Learning Outcomes from Participation in Citizen Science. *Citizen Science: Theory and Practice*, 3(2), 3. <https://doi.org/10.5334/cstp.126>
- Phillips, T. B., Ballard, H. L., Lewenstein, B. v., & Bonney, R. (2019). Engagement in science through citizen science: Moving beyond data collection. *Science Education*, 103(3), 665–690. <https://doi.org/10.1002/sce.21501>
- Pierce, R., & Evram, M. (2022). Getting it right: implementing data protection in citizen science research. *Insights the UKSG Journal*, 35. <https://doi.org/10.1629/uksg.538>
- Pino, V., McBratney, A., O'Brien, E., & Ng, W. (2021). Boosting soil citizen-science using Tea Bag Index method towards soil security in Australia. *Soil Security*, 5, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100016>
- Pino, V., McBratney, A., O'Brien, E., Singh, K., & Pozza, L. (2022). Citizen science & soil connectivity: Where are we? *Soil Security*, 9, 100073. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100073>
- Pocock, M. J. O., Tweddle, J. C., Savage, J., Robinson, L. D., & Roy, H. E. (2017). The diversity and evolution of ecological and environmental citizen science. *PLOS ONE*, 12(4), e0172579. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172579>
- Pocock, M. J. O., Chandler, M., Bonney, R., Thornhill, I., Albin, A., August, T., Bachman, S., Brown, P. M. J., Cunha, D. G. F., Grez, A., Jackson, C., Peters, M., Rabarijaon, N. R., Roy, H. E., Zaviezo, T., & Danielsen, F. (2018). A Vision for Global Biodiversity Monitoring With Citizen Science (pp. 169–223). <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2018.06.003>
- Ponto, J. (2015). Understanding and Evaluating Survey Research. *Journal of the Advanced Practitioner in Oncology*, 6(2), 168–171.
- Popp, J., Lakner, Z., Harangi-Rákos, M., & Fári, M. (2014). The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 559–578. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.056>
- Prăvălie, R., Borrelli, P., Panagos, P., Ballabio, C., Lugato, E., Chappell, A., Miguez-Macho, G., Maggi, F., Peng, J., Niculiță, M., Roșca, B., Patriche, C., Dumitrașcu, M., Bandoc, G., Nita, I.A., & Birsan, M.V. (2024). A unifying modelling of multiple land degradation pathways in Europe. *Nat Commun* 15, 3862. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48252-x>
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>
- Ramsey, C. A., & Hewitt, A. D. (2005). A Methodology for Assessing Sample Representativeness. *Environmental Forensics*, 6(1), 71–75. <https://doi.org/10.1080/15275920590913877>
- Ranjard, L., Dequiedt, S., Chemidlin Prévost-Bouré, N., Thioulouse, J., Saby, N.P.A., Lelievre, M., Maron, P.A., Morin, F.E.R., Bispo, A., Jolivet, C., Arrouays, D., & Lemanceau, P. (2013).

- Turnover of soil bacterial diversity driven by wide-scale environmental heterogeneity. *Nature Communications*, 4(1), 1434. <https://doi.org/10.1038/ncomms2431>
- Ranjard, L. (2020). *Sciences participatives au service de la qualité écologique des sols*. Techniques de l'Ingénieur, 24 pp.
- Ranjard, L., Sauter, J., Auclerc, A., Chauvin, C., Cluzeau, D., Mereau, D., Loiseau-Dubosc, P., Lemerrier, B., d'Oiron, E., Raous, S., Roturier, C., Rovillé, M., Serin, L., & Gascuel, C. (2022). *Sciences et recherches participatives sur les sols en France : bilan et perspectives*, *Étude et Gestion des Sols*, 29, 381-393
- Ratié, C., Richer-de-Forges, A., Berché, P., Boulonne, L., Toutain, B., Saby, N., Chenu, J.-P., Laloua, D., Ortolland, B., Soler-Dominguez, N., Jolivet, C., & Arrouays, D. (2010). Le conservatoire national d'échantillons de sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 17, 263-273.
- Reboud, X., Fournier, D., Leiser, H., Tatry, M.-V., Barbier, M., & Cointet, J.-P. (2012). Analyse lexicale du corpus bibliométrique « agroécologie » au sens restreint, In: Inra, ed. *Rapport INRA du chantier Agro-écologie*. pp.85-87
- Réchauchère, O., Bispo, A., Gabrielle, B., & Makowski, D. (2018). *Sustainable Agriculture Reviews 30* (Vol. 30). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96289-4>
- Reyes-Rojas, J., Montagne, D., Saby, N.P.A., Coblinski, J., Pindral, S., Medina-Roldán, E., Lorenzetti, R., Scammacca, O., Piccini, C., Borůvka, K., & Cornu, S. (en préparation). Existing Soil Threats and Soil-related Ecosystem Services Maps at the European-Level, a basis for Bundles Assessment?
- Reynolds, C., Oakden, L., West, S., Pateman, R., & Elliott, C. (2021). *Citizen Science and Food: A Review*. London: Food Standards Agency. doi: 10.46756/sci.fsa.nao903
- Richer-de-Forges, A.C., & Arrouays, D. (2010). Analysis of requests for information and data from a national soil data centre in France. *Soil Use and Management*, 26: 374-378. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00267.x>
- Richer-de-Forges, A.C., Arrouays, D., Bardy, M., Bispo, A., Lagacherie, P., Laroche, B., Lemerrier, B., Sauter, J., & Voltz, M. (2019). Mapping of soils and land-related environmental attributes in France: analysis of end-users' needs. *Sustainability* 11 (10), 2940. <https://doi.org/10.3390/su11102940>.
- Richter, F. J., Suter, M., Lüscher, A., Buchmann, N., el Benni, N., Feola Conz, R., Hartmann, M., Jan, P., & Klaus, V. H. (2024). Effects of management practices on the ecosystem-service multifunctionality of temperate grasslands. *Nature Communications*, 15(1), 3829. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48049-y>
- RMQS (n.d.). Available at: www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34 [Last accessed 25 May 2024]
- Robinson, J., Cawthray, J., West, S., Bonn, A., & Ansine, J. (2018). Ten principles of citizen science. In: Hecker, S., Haklay, M., Bowser, A., Makuch, Z., Vogel, J. & Bonn, A. 2018. *Citizen Science: Innovation in Open Science, Society and Policy*. UCL Press, London. <https://doi.org/10.14324/111.9781787352339>
- Roche, J., Bell, L., Galvão, C., Golumbic, Y. N., Kloetzer, L., Knoben, N., Laakso, M., Lorke, J., Mannion, G., Massetti, L., Mauchline, A., Pata, K., Ruck, A., Taraba, P., & Winter, S. (2020). Citizen Science, Education, and Learning: Challenges and Opportunities. *Frontiers in Sociology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsoc.2020.613814>
- Román Dobarco, M., Arrouays, D., Lagacherie, P., Ciampalini, R., & Saby, N.P.A. (2017). Prediction of topsoil texture for Region Centre (France) applying model ensemble methods, *Geoderma*, Volume 298, 2017, Pages 67-77, ISSN 0016-7061

- Rüfenacht, S., Woods, T., Agnello, G., Gold, M., Hummer, P., Land-Zandstra, A., & Sieber, A. (2021). Communication and Dissemination in Citizen Science. In: Vohland K., A. Land-Zandstra, L. Ceccaroni, R. Lemmens, J. Perelló, M. Ponti, R. Samson, & K. Wagenknecht (Eds.), *The Science of Citizen Science* (pp. 475-494). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_24
- Rumpel, C., Amiraslani, F., Koutika, L-S., Smith, P., Whitehead, D., & Wollenbeg, L. (2018). Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges. *Comment in Nature* 564, 32–34. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07587-4>
- Rumpel, C., Amiraslani, F., Chenu, C., Garcia Cardenas, M., Kaonga, M., Koutika, L.-S., Ladha, J., Madari, B., Shirato, Y., Smith, P., Soudi, B., Soussana, J.-F., Whitehead, D., & Wollenberg, E. (2020). The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. *Ambio*, 49(1), 350–360. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>
- Ruysschaert, G., De Boever, M., Jacob, M., Maenhout, P., & D'Hose, T. (2021). Towards climate-smart sustainable management of agricultural soils in Flanders: Part II: EJP SOIL survey on current research knowledge and stakeholder views on knowledge needs, barriers and opportunities for the knowledge system. In: ILVO Mededeling, 272.
- Ryan, S. F., Adamson, N. L., Aktipis, A., Andersen, L. K., Austin, R., Barnes, L., Beasley, M. R., Bedell, K. D., Briggs, S., Chapman, B., Cooper, C. B., Corn, J. O., Creamer, N. G., Delborne, J. A., Domenico, P., Driscoll, E., Goodwin, J., Hjarding, A., Hulbert, J. M., & Dunn, R. R. (2018). The role of citizen science in addressing grand challenges in food and agriculture research. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1891), 20181977. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1977>
- Saby, N.P.A., Arrouays, D., Boulonne, L., Jolivet, C., & Pochot, A. (2006). Geostatistical assessment of Pb in soil around Paris, France. *Science of The Total Environment*, 367(1), 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.028>
- Saby, N.P.A., Arrouays, D., Antoni, V., Lemercier, B., Follain, S., Walter, C., & Schwartz, C. (2008). Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990-2004. *Soil Use and Management*, 24(3), 254–262. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00159.x>
- Saby, N.P.A., Marchant, B.P., Lark, R.M., Jolivet, C.C., & Arrouays, D. (2011). Robust geostatistical prediction of trace elements across France. *Geoderma*, 162(3–4), 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.03.001>
- Saby, N.P.A. (2019). Ensemble de statistiques sommaires issues de la Base de Données d'Analyse de Terre (BDAT). *Recherche Data Gouv*, V3. <https://doi.org/10.15454/NFQRRB>
- Saby, N.P.A., Durocher, A., Loiseau, T., Freulon, X., de Fouquet, C., & Bispo, A. (2023). Prédiction spatialisées des distributions des éléments As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Mo, Pb, Tl, Zn dans les sols de France à partir du RMQS. *Recherche Data Gouv*, V1. <https://doi.org/10.57745/Z11DXW>
- Sandén, T., Wawra, A., Berthold, H., Miloczki, J., Schweinzer, A., Gschmeidler, B., Spiegel, H., Debeljak, M., & Trajanov, A. (2021). TeaTime4Schools: Using Data Mining Techniques to Model Litter Decomposition in Austrian Urban School Soils. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.703794>
- Sandoval, M., & Tarot, C. (2014). Etude bibliométrique sur les transitions nutritionnelles. Les transitions nutritionnelles dans la littérature scientifique internationale. Méthodologie (démarche d'exploration) et résultats d'analyses, Rapport de l'étude bibliométrique sur l'axe 6 du MP GloFoodS. INRA, Paris, p. 73.

- Savoie-Zajc, L. (2007). Comment peut-on construire un échantillonnage scientifiquement valide?. In: *Recherches Qualitatives*, 5, pp. 99–111.
- Schaefer, T., Kieslinger, B., Brandt, M., & Van den Bogaert, V. (2021a). Evaluation in Citizen Science: The Art of Tracing a Moving Target. In *The Science of Citizen Science* (pp. 495–514). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_25
- Schaefer, T., Kieslinger, B., & Fabian, C.M. (2021b). EU-Citizen.Science: D7.3. Final impact assessment report, ZSI, Vienna
- Schillaci, C., Muntwyler, A., Marechal, A., Orgiazzi, A., Jones, A., Ciupagea, C., Belitrandi, D., De Medici, D., De Rosa, D., Vieira, D., Matthews, F., Martin-Jimenez, J., Koeninger, J., Liakos, L., Montanarella, L., Labouyrie, M., Van Liedekerke, M., Panagos, P., Scarpa, S., & Wojda, P. (2022). European soil observatory (EUSO) structure and perspectives, EGU General Assembly 2022, Vienna, EGU22-5248, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5248>
- Schirpke, U., Kohler, M., Leitinger, G., Fontana, V., Tasser, E., & Tappeiner, U. (2017). Future impacts of changing land-use and climate on ecosystem services of mountain grassland and their resilience. *Ecosystem Services*, 26, 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.008>
- Schneider, R., Morreale, S., Li, Z., Menzies Puer, E., Kurtz, K., Ni, X., Wang, C., Li, C., & van Es, H. (2020). Restoring soil health to reduce irrigation demand and buffer the impacts of drought. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(3), 339. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020348>
- Schreefel, L., Schulte, R.P.O., de Boer, I.J.M., Schrijver, A.P., & van Zanten, H.H.E. (2020). Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, 26, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>
- Schubert, S. D., Suarez, M. J., Pegion, P. J., Koster, R. D., & Bacmeister, J. T. (2004). On the Cause of the 1930s Dust Bowl. *Science*, 303(5665), 1855–1859. <https://doi.org/10.1126/science.1095048>
- Schuttler, S. G., Sorensen, A. E., Jordan, R. C., Cooper, C., & Shwartz, A. (2018). Bridging the nature gap: can citizen science reverse the extinction of experience? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(7), 405–411. <https://doi.org/10.1002/fee.1826>
- Schweiz forscht (n.d.). Available at: www.schweizforscht.ch [Last accessed 5 June 2023]
- SCImago (2023). SJR — SCImago Journal & Country Rank [Portal]. Available at: <http://www.scimagojr.com> (accessed 13 March 2023)
- Senabre Hidalgo, E., Perelló, J., Becker, F., Bonhoure, I., Legris, M., & Cigarini, A. (2021). Participation and Co-creation in Citizen Science. In: Vohland K., A. Land-Zandstra, L. Ceccaroni, R. Lemmens, J. Perelló, M. Ponti, R. Samson, & K. Wagenknecht (Eds.), *The Science of Citizen Science* (pp. 199–218). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_11
- Sharon, A.J., & Baram-Tsabari, A. (2014). Measuring mumbo jumbo: a preliminary quantification of the use of jargon in science communication. *Public Underst. Sci.* 23 (5), 528–546. <https://doi.org/10.1177/0963662512469916>.
- Shukla, S., & Arora, G. (2023). Soil quality perceptions: Characterizing bias and linkage with farming decisions for rice-growers in India. *Agricultural and Applied Economics Association*. 2023 Annual Meeting, July 23-25, Washington D.C. 336014.
- Smith, V., French, L., Vincent, S., Woodburn, M., Addink, W., Arvanitidis, C., Bánki, O., Casino, A., Dusoulier, F., Glöckler, F., Hobern, D., Kalfatovic, M. R., Koureas, D., Mergen, P., Miller, J., Schulman, L., & Juslén, A. (2022). Research Infrastructure Contact Zones: a framework and dataset to characterise the activities of major biodiversity informatics initiatives. *Biodiversity Data Journal*, 10. <https://doi.org/10.3897/BDJ.10.e82953>

- Somerwill, L., & Wehn, U. (2022). How to measure the impact of citizen science on environmental attitudes, behaviour and knowledge? A review of state-of-the-art approaches. *Environmental Sciences Europe*, 34(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00596-1>
- Staunton, S., Saby, N.P.A., Arrouays, D., & Quiquampoix, H. (2020). Can soil properties and land use explain glomalin-related soil protein (GRSP) accumulation? A nationwide survey in France. *CATENA*, 193, 104620. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104620>
- Stoessel, F., Sonderegger, T., Bayer, P., & Hellweg, S. (2018). Assessing the environmental impacts of soil compaction in Life Cycle Assessment. *Science of The Total Environment*, Volume 630, 2018, 913-921, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.222>.
- Strauss, V., Paul, C., Dönmez, C., Löbmann, M., & Helming, K. (2023). Sustainable soil management measures: a synthesis of stakeholder recommendations. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(1), 17. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00864-7>
- Styc, Q., Saby, N., Poeplau, C., Fantappiè, M., Van Egmond, F., Beno, A., Toth, B., Bakacsiand, Z., & Bispo, A. (2023). Comparison of LUCAS and national Soil Information Monitoring System (SIMS) datasets – Exploring the technical possibilities to support the development of an EU harmonized monitoring system. *Soil Mapping for a Sustainable Future: 2. joint Workshop of the IUSS Working Groups Digital Soil Mapping and Global Soil Map, The Studium; INRAE Info&Sols, Feb 2023, Orléans, France. p. 38. {hal-04015704}*
- Sullivan-Wiley, K.A., & Short Gianotti, A.G. (2017). Risk Perception in a Multi-Hazard Environment. *World Development*, 97, 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.04.002>
- Suman, A.B., & Pierce, R. (2018). Challenges for Citizen Science and the EU Open Science Agenda under the GDPR. *European Data Protection Law Review*, 4(3), 284–295. <https://doi.org/10.21552/edpl/2018/3/7>
- Sun, J., Zhu, H., Li, W., Li, S., Fang, L., Xia, Q., Tao, N., Wu, C., & Zhang, A. (2023). Regional soil contamination by halogenated organic pollutants attributed to E-waste recycling, scattered industrialization and urbanization. *Soil Use and Management*, 39, 659–672. <https://doi.org/10.1111/sum.12865>
- Swiderski, C., Saby, N., Boulonne, L., Jolivet, C., & Cousin, I. (2017). Méthodologie d'élaboration du plan d'échantillonnage de la deuxième campagne du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France par intégration multi-critères : capacité à détecter une évolution temporelle, évaluation du réservoir en eau utilisable et contraintes logistiques. *Etude et Gestion des Sols*, 24, 83-98
- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T.C., Kremen, C., van der Heijden, M.G.A., Liebman, M., & Hallin, S. (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, 6(45). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>
- Tancoigne, E., Barbier, M., Cointet, J.-P., & Richard, G. (2014). Les services écosystémiques dans la littérature scientifique : démarche d'exploration et résultats d'analyse. *INRA*, 69 p.
- Tasantab, C.J., Gajendran, T., & Maund, K. (2022). How the past influences the future: flood risk perception in informal settlements. *Environmental Hazards*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/17477891.2022.2130854>
- Teshome, A., de Graaff, J., Ritsema, C., & Kassie, M. (2016). Farmers' perceptions about the influence of land quality, land fragmentation and tenure systems on sustainable land management in the north western Ethiopian highlands. *Land Degradation & Development*, 27(4), 884–898. <https://doi.org/10.1002/ldr.2298>
- Thelwall, M., & Sud, P. (2022). Scopus 1900–2020: Growth in articles, abstracts, countries, fields, and journals. *Quantitative Science Studies*, 3(1), 37–50. https://doi.org/10.1162/qss_a_00177

- Thorsøe, M.H. (2021). Deliverable 2.7. Report on the current availability and use of soil knowledge. In: EJP SOIL. Available at: [https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP2/Deliverable_2.7_Report_on_the_availability_and_use_of_soil_knowledge.pdf](https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP2/Deliverable_2.7_Report_on_the_current_availability_and_use_of_soil_knowledge.pdf) [Last accessed 5 July 2023].
- Tittonell, P., & Giller, K. E. (2013). When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research*, 143, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.007>
- Tobias, S., Conen, F., Duss, A., Wenzel, L. M., Buser, C., & Alewell, C. (2018). Soil sealing and unsealing: State of the art and examples. *Land Degradation & Development*, 29(6), 2015–2024. <https://doi.org/10.1002/ldr.2919>
- Tóth, G., Montanarella, L., & Rusco, E. (2008). Threats to soil quality in Europe. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 151 pp
- Tóth, G. (2012). Impact of land-take on the land resource base for crop production in the European Union. *Science of The Total Environment*, 435–436, 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.103>
- Tóth, G., Ivits, E., Prokop, G., Gregor, M., Fons-Esteve, J., Milego Agràs, R., & Mancosu, E. (2022). Impact of Soil Sealing on Soil Carbon Sequestration, Water Storage Potentials and Biomass Productivity in Functional Urban Areas of the European Union and the United Kingdom. *Land*, 11(6), 840. <https://doi.org/10.3390/land11060840>
- Trimble, M., & Berkes, F. (2013). Participatory research towards co-management: Lessons from artisanal fisheries in coastal Uruguay. *Journal of Environmental Management*, 128, 768–778. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.032>
- Turrini, T., Dörler, D., Richter, A., Heigl, F., & Bonn, A. (2018). The threefold potential of environmental citizen science - Generating knowledge, creating learning opportunities and enabling civic participation. *Biological Conservation*, 225, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.03.024>
- Ubando, A. T., del Rosario, A. J. R., Chen, W.-H., & Culaba, A. B. (2021). A state-of-the-art review of biowaste biorefinery. *Environmental Pollution*, 269, 116149. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116149>
- Ugolini, F., Massetti, L., Sanesi, G., & Pearlmutter D. (2015). Knowledge transfer between stakeholders in the field of urban forestry and green infrastructure: results of a European survey. *Land Use Policy* 49, 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.08.019>.
- Van der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Farfan, M., Montanarella, L., Six, J., & Wall, D. H. (2023). Soil biodiversity needs policy without borders. *Science*, 379(6627), 32–34. <https://doi.org/10.1126/science.abn7248>
- Vanino, S., Farina, R., Pirelli, T., di Bene, C., Calzolari, C., Napoli, R., Piccini, C., & Fantappie, M. (2022). Soil priorities for Italy. A multi-stakeholder consultation, barriers and opportunities for research system. *Geoderma Region*. 29, e00528 <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00528>.
- Vanino, S., Pirelli, T., di Bene, C., Bøe, F., Castanheira, N., Chenu, C., Cornu, S., Feiza, V., Fornara, D., Heller, O., Kasparinskis, R., Keesstra, S., Lasorella, M.V., Madenoğlu, S., Meurer, K.H.E., O’Sullivan, L., Peter, N., Piccini, C., Siebielec, G., Smreczak, B., Thorsøe, M. & Farina, R. (2023). Barriers and opportunities of soil knowledge to address soil challenges: Stakeholders’ perspectives across Europe. *Journal of Environmental Management*, 325, 116581. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116581>
- Vattakaven, T., Barve, V., Ramaswami, G., Singh, P., Jagannathan, S., & Dhandapani, B. (2022). Best Practices for Data Management in Citizen Science - An Indian Outlook. *Biodiversity Informatics*, 17. <https://doi.org/10.17161/bi.v17i.16441>

- Veeckman, C., Talboom, S., Gijssels, L., Devoghel, H., & Duerinckx, A. (2019). *Communication in Citizen Science. A practical guide to communication and engagement in citizen science*. SCIVIL, Leuven, Belgium.
- Veeckman, C., & Temmerman, L. (2021). Urban Living Labs and Citizen Science: From Innovation and Science towards Policy Impacts. *Sustainability*, 13(2), 526. <https://doi.org/10.3390/su13020526>
- Veerman, C., Correia, T.P., Bastioli, C., Biro, B., Bouma, J., Ciencala, E., Emmett, B., Frison, E.A., Grand, A., Filchew, L.H., Kriauciniene, Z., Pogrzeba, M., Soussana, J.-F., Olmo, C.V., & Wittkowski, R. (2020). *Caring for Soil Is Caring for Life - Ensure 75% of Soils Are Healthy by 2030 for Food, People, Nature and Climate*. European Commission, Brussels.
- Veerman, C. P. (2023). Activity update of the Mission Board of European Union on soil health and food. *Soil & Environmental Health*, 1, 100018.
- Villanneau, E., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Jolivet, C.C., Boulonne, L., Caria, G., Barriuso, E., Bispo, A., & Briand, O. (2009). Spatial distribution of lindane in topsoil of Northern France. *Chemosphere*, 77(9), 1249–1255. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.060>
- Villanneau, E.J., Saby, N.P.A., Marchant, B.P., Jolivet, C.C., Boulonne, L., Caria, G., Barriuso, E., Bispo, A., Briand, O., & Arrouays, D. (2011). Which persistent organic pollutants can we map in soil using a large spacing systematic soil monitoring design? A case study in Northern France. *Science of The Total Environment*, 409(19), 3719–3731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.048>
- Visser, S., Keesstra, S., Maas, G., de Cleen, M., & Molenaar, C. (2019). Soil as a Basis to Create Enabling Conditions for Transitions Towards Sustainable Land Management as a Key to Achieve the SDGs by 2030. *Sustainability*, 11(23), 6792. <https://doi.org/10.3390/su11236792>
- Von Gönner, J., Herrmann, T. M., Bruckermann, T., Eichinger, M., Hecker, S., Klan, F., Lorke, J., Richter, A., Sturm, U., Voigt-Heucke, S., Brink, W., Liedtke, C., Premke-Kraus, M., Altmann, C., Bauhus, W., Bengtsson, L., Büermann, A., Dietrich, P., Dörler, D., & Bonn, A. (2023). Citizen science's transformative impact on science, citizen empowerment and socio-political processes. *Socio-Ecological Practice Research*, 5(1), 11–33. <https://doi.org/10.1007/s42532-022-00136-4>
- Wehn, U., Ghareisifard, M., Ceccaroni, L., Joyce, H., Ajates, R., Woods, S., Bilbao, A., Parkinson, S., Gold, M., & Wheatland, J. (2021). Impact assessment of citizen science: state of the art and guiding principles for a consolidated approach. *Sustainability Science*, 16(5), 1683–1699. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-00959-2>
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030>
- Whitfield, P. H. (2012). Floods in future climates: a review. *Journal of Flood Risk Management*, 5(4), 336–365. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2012.01150.x>
- Wickham, H. (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Golem, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., Takahashi, K., Vaughan, D., Wilke, C., Woo, K., & Yutani, H. (2019). “Welcome to the tidyverse”. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., & Mons, B. (2016).

- The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1), 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- WOCAT (2023). World overview of conservation approaches and technologies. Global Data Base on Sustainable Land Management <https://qcat.wocat.net/>
- World Economic Forum (2020). The global risks report 2020 - 15th Edition. World Economic Forum. Available at: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf (accessed 13 March 2023)
- Wright, J., Kenner, S., & Lingwall, B. (2022). Utilization of Compost as a Soil Amendment to Increase Soil Health and to Improve Crop Yields. *Open Journal of Soil Science*, 12(06), 216–224. <https://doi.org/10.4236/ojss.2022.126009>
- Xu, Z., Xu, J., Deng, X., Huang, J., Uchida, E., & Rozelle, S. (2006). Grain for Green versus Grain: Conflict between Food Security and Conservation Set-Aside in China. *World Development*, 34(1), 130–148. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2005.08.002>
- Xu, J., Morris, P. J., Liu, J., & Holden, J. (2018). PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. *CATENA*, 160, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.010>
- Zhang, Y., & Biswas, A. (2017). The Effects of Forest Fire on Soil Organic Matter and Nutrients in Boreal Forests of North America: A Review. In *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices* (pp. 465–476). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5_21
- Zhang, J., Wang, B., Chen, X., Wu, X., Zhang, D. (2019). Research trends on land use changes during 1991–2015: A Bibliometric Analysis. *Lowland Technology International* June 2019, Volume 21 (1): 61-70

ANNEXES

Annexe A

Suppléments de l'introduction sur l'évolution au fil du temps de différents concepts sur les sols

Mots-clés de recherche utilisés par concept

Mots clés de recherche	
Soil threats	TITLE("soil* erosion" OR "soil* pollution" OR "soil* contamination" OR "soil* acidification" OR "soil* salinification" OR "soil* carbon loss" OR "loss of soil* carbon" OR "soil* organic carbon loss" OR "loss of soil* organic carbon" OR "soil* compaction" OR "loss of soil biodiversity" OR "soil biodiversity loss" OR "soil* sealing" OR "soil* artificialisation" OR "land take" OR "soil* artificialization")
Soil fertility	TITLE("soil* fertility")
Soil health	TITLE("soil* health" OR "healthy soil*")
Soil quality	TITLE("soil* quality")
Ecosystem services	TITLE(soil* AND (("supporting services" OR "regulating services" OR "provisioning services" OR "cultural services" OR "nutrient cycling" OR "carbon storage" OR "climate regulation" OR "water filtration" OR "food production" OR "habitat provisioning" OR "recreational value" OR "biodiversity conservation") OR "ecosystem* services*"))

Suppléments de l'article (*chapitre 2*) sur l'état des lieux des connaissances scientifiques existantes sur les sols

Mots-clés de recherche utilisés par défi sociétal et par domaine de connaissance

Mots clés de recherche	
Increase biomass production	(TITLE(("soil" OR "land") AND (((increas* OR enhanc* OR reinforc* OR support*)) W/5 (food OR energy OR "crop" OR wood OR "yield" OR timber))) OR KEY(("soil" OR "land") AND (((increas* OR enhanc* OR reinforc* OR support*)) W/5 (food OR energy OR "crop" OR wood OR "yield" OR timber))))
Mitigate land take	(TITLE(("soil" OR "land") AND ((seal* OR unseal* OR urbanizat* OR urbanisat* OR "land take" OR "land uptake" OR artificiali* OR "urban sprawl" OR "brownfield") W/5 ("no net" OR mitigat* OR attenuat* OR reduce* OR reduction OR avoid* OR compensat* OR stop* OR regulat* OR limit* OR protect* OR combat* OR tackl* OR prevent* OR remediat* OR recultivation OR redevelopment))) OR KEY(("soil" OR "land") AND ((seal* OR unseal* OR urbanizat* OR urbanisat* OR "land take" OR "land uptake" OR artificiali* OR "urban sprawl" OR "brownfield") W/5 ("no net" OR mitigat* OR attenuat* OR reduce* OR reduction OR avoid* OR compensat* OR stop* OR regulat* OR limit* OR protect* OR combat* OR tackl* OR prevent* OR remediat* OR recultivation OR redevelopment))))
Mitigate climate change	(TITLE(("soil" OR "land") AND ("climate change" OR "global warming" OR "greenhouse gas*") W/5 (mitigat* OR reduction OR reducing OR limit* OR limiting OR abatement OR protect* OR combat* OR tackl* OR stop* OR regulat* OR avoid*))) OR

	KEY(("soil" OR "land") AND (("climate change" OR "global warming" OR "greenhouse gas*") W/5 (mitigat* OR reduction OR reducing OR limit* OR limiting OR abatement OR protect* OR combat* OR tackl* OR stop* OR regulat* OR avoid*))))
Adapt to climate change	(TITLE(("soil" OR "land") AND (("climate change" OR "global warming") W/5 (adapt* OR resilien* OR adjust* OR support*))) OR KEY(("soil" OR "land") AND (("climate change" OR "global warming") W/5 (adapt* OR resilien* OR adjust* OR support*)))
Reduce soil degradation	(TITLE(("soil" OR "land") AND ("erosion" OR "compaction" OR "pollution" OR "degradation" OR "contamination" OR "desertification" OR "salinization" OR "acidification") W/5 ("zero net" OR reduce* OR reduction OR restorat* OR remediat* OR prevent* OR rehabilitat* OR stop* OR mitigat* OR limit* OR abatement OR protect* OR combat* OR tackl* OR regulat* OR avoid* OR improv* OR control* OR attenuat*)) OR KEY(("soil" OR "land") AND ("erosion" OR "compaction" OR "pollution" OR "degradation" OR "contamination" OR "desertification" OR "salinization" OR "acidification") W/5 ("zero net" OR reduce* OR reduction OR restorat* OR remediat* OR prevent* OR rehabilitat* OR stop* OR mitigat* OR limit* OR abatement OR protect* OR combat* OR tackl* OR regulat* OR avoid* OR improv* OR control* OR attenuat*))
Improve ecosystem services	(TITLE(("soils" OR "land") AND ("ecosystem* services" W/5 (increas* OR enhanc* OR reinforc* OR regulat* OR support* OR restaur*))) OR KEY(("soils" OR "land") AND ("ecosystem* services" W/5 (increas* OR enhanc* OR reinforc* OR regulat* OR support* OR restaur*)))
Improve biodiversity	TITLE(("soil" OR "land") AND (("biodiversity" OR "biota") W/5 (increas* OR enhanc* OR reinforc* OR maintain* OR regulat* OR support* OR impact*))) OR KEY(("soil" OR "land") AND (("biodiversity" OR "biota") W/5 (increas* OR enhanc* OR reinforc* OR maintain* OR regulat* OR support* OR impact*)))
Improve disaster control	(TITLE(("soil" OR "land") AND (("wildfire" OR "forest fire" OR "landslide" OR "mudflow" OR "flood" OR "drought" OR "extreme weather" OR "extreme climate" OR "disaster" OR "dust storm") W/5 (mitigat* OR improv* OR prevent* OR control* OR reduc* OR stop* OR attenuat* OR avoid* OR protect* OR limit* OR resilien*))) OR KEY(("soil" OR "land") AND (("wildfire" OR "forest fire" OR "landslide" OR "mudflow" OR "flood" OR "drought" OR "extreme weather" OR "extreme climate" OR "disaster" OR "dust storm") W/5 (mitigat* OR improv* OR prevent* OR control* OR reduc* OR stop* OR attenuat* OR avoid* OR protect* OR limit* OR resilien*)))
Living Labs and Lighthouses	(TITLE-ABS-KEY(("living labs" OR "lighthouses" OR "flagship"))
Technical economic & social innovation	(TITLE((innovat* OR new) AND (technic* OR tech* OR economic* OR social* OR "practice" OR biol* OR manage* OR process* OR strategi*)) OR KEY((innovat* OR new) AND (technic* OR tech* OR economic* OR social* OR "practice" OR biol* OR manage* OR process* OR strategi*)))
Data management, sensing & monitoring	(TITLE("data management" OR "sensing" OR monitor*) OR KEY("data management" OR "sensing" OR monitor*))
Assessment & modelling	TITLE(model* OR assess* OR analy* OR "mapping" OR "maps") OR KEY(model* OR assess* OR analy* OR "mapping" OR "maps")
Awareness, training and education	(TITLE("capacity building" OR "awareness" OR "training" OR "education") OR KEY("capacity building" OR "awareness" OR "training" OR "education"))
Science based policy support	(TITLE(("science" AND (policies OR policy)) OR "policy support" OR "policies support") OR KEY(("science" AND (policies OR policy)) OR "policy support" OR "policies support"))
Institutions & governance	(TITLE("governance" OR "institution") OR KEY("governance" OR "institution"))
Specific regions	(TITLE("mountain" OR "peatland" OR "marshland" OR "coastal area" OR "artic" OR "karst area" OR "island" OR "mediterranean" OR "boreal") OR KEY("mountain" OR "peatland" OR "marshland" OR "coastal area" OR "artic" OR "karst area" OR "island" OR "mediterranean" OR "boreal"))
Specific sectors and practices	(TITLE("vineyard" OR "orchard" OR "market gardening" OR "agroforestry" OR "mixed crop*" OR "intercrop*") OR KEY("vineyard" OR "orchard" OR "market gardening" OR "agroforestry" OR "mixed crop*" OR "intercrop*"))

Annexe B

Suppléments de l'article (*chapitre 3*) sur les systèmes de surveillance des sols en Europe

Questionnaire envoyé aux acteurs

Section 1 – Country and name of your soil monitoring system

Country:

Name of the soil monitoring system:

Section 2 – Description of your national soil monitoring system

Contact name(s) and email(s):

Who is responsible for the soil monitoring system:

Funding institution:

Main aim of the monitoring:

Starting year:

Is the database accessible? If yes, by which support:

Still running:

If still running, date of the next campaign:

If not running can you comment:

Number of campaigns to date:

Interval between 2 sampling campaigns (in years) if regular or dates of sampling campaigns:

Land uses investigated:

Section 3 – Sampling strategies

Number of sampling sites on average:

Sampling design type:

Sampling design specifications:

Is a GPS used do for the determination of site coordinates:

Geolocalisation precision (in meters):

Data on soil management (eg. rotations, crop management, tillage..) available:

If yes, please comment:

Are all sampling sites treated the same:

If not all sites are treated the same, please describe:

Area of the sampling support (m²):

Design of the sampling support area:

Composite sampling:

How many samples are taken in the sampling support area for one depth interval:

Sampling depth type:

If fixed depths, describe intervals:

Sampling tool(s):

Do you take samples for bulk density:

If yes, what is the number of samples taken for bulk density per location (describe at which depth):

Section 4 – Soil profile description

Do you perform a soil profile description:

Description of the way in which the soil is exposed for description:

Are pictures taken of the soil profile:

Are samples taken for soil description analysed to characterize soil type:

Weight of the final sample (kg):

Sampling depth type for soil description:

Soil standard used for soil description:

Reference or link to the reference documents for description and the classification:

Section 5 – Parameters measured (fill in this table)

Measured parameters	ISO methods recommended by the EU Directive	Is this parameter measured?	If yes: measuring unit	If yes: is the method used related to ISO method or another
<i>pH in water</i>	ISO 10390			
<i>pH KCl</i>				
<i>pH CaCl2</i>				
<i>Sand</i>	ISO 11277			
<i>Silt</i>				
<i>Clay</i>				
<i>ECEC</i>	ISO 11260			
<i>Electrical Conductivity</i>	ISO 11265			
<i>Apparent density of the surface horizon (horizon A)</i>	ISO 11272			
<i>Deep soil bulk density</i>	ISO 11272			
<i>Water retention</i>	ISO 11274			
<i>Saturated hydraulic conductivity (Ksat)</i>	ISO 17313			
<i>Organic carbon</i>	ISO 10694			
<i>Carbonate content</i>	ISO 10693			
<i>Distribution of soil organisms</i>				
<i>Pollution with heavy metals</i>	ISO 54321			
<i>Pollution with organic substances</i>				
<i>Total nitrogen content</i>	ISO 11261 or ISO 13878			
<i>Extractable phosphorus</i>	ISO 11263			
<i>Other macro and micro nutrients</i>				

Annexe C

Suppléments des articles (*chapitres 3 et 4*) sur leur perception des acteurs sur les menaces pesant sur les sols ainsi que sur l'accès à la connaissance sur les sols

Questionnaire envoyé aux acteurs

(translated from French to English)

Description of the survey

Soil is a key environmental compartment that has never been so much in the spotlight. However, the perception of soils by the stakeholders concerned has only been studied to a very limited extent. A national survey has therefore been launched on stakeholders' perceptions of soil threats. This study is part of the EJP SOIL, a European programme on agricultural soils co-financed by the European Commission. This programme is entitled "SOL - Towards a climate-smart and sustainable management of agricultural soils". Your personal opinion is requested. Responses are anonymous and will be grouped by stakeholders. It will therefore not be possible to link responses to names or entities. The survey will take about 15-20 minutes. You will not be asked to fill in all the pages of the survey, which vary according to the type of stakeholder.

Section 1 - Your profile

In which age group do you fall? (*tick one box*)

- | | | |
|---|--|----------------------------------|
| ☐ Under 25 years old | ☐ Between 35 and 49 | ☐ Over 65 |
| ☐ Between 25 and 34 | ☐ Between 50 and 65 | |

What is the highest degree you have obtained? (*tick one box*)

- | | |
|--|--|
| ☐ No diploma | ☐ Certificate or associate degree |
| ☐ High school diploma | ☐ University degree |

Which department do you work in? (*select your department from the drop-down list*)

What type of soil do you work with the most? (*tick one or more boxes as appropriate*)

- | | |
|---|--|
| ☐ Urban / peri-urban soils | ☐ Forest soils |
| ☐ Agricultural soils | ☐ Industrial and mining soils |

How important is the role of soil in your work? (*tick one box*)

- | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|---|
| ☐ High | ☐ Low | ☐ I don't know / hard to say |
| ☐ Average | ☐ Not at all | |

In which field do you work? (*tick one box*)

- | | | |
|--|---|--|
| ☐ Public authority | ☐ Farmer | ☐ Consultancy firm |
| ☐ Scientific researcher | ☐ Advisor | ☐ Farmers' union |
| ☐ Agricultural school | ☐ Technical | ☐ Analysis laboratory |
| ☐ NGO | ☐ agricultural institute | ☐ Agro-industry |

At what scale do you work? *(tick one box)*

- ☐ Local ☐ Regional / national ☐ International

Section 1 – Your profile – You are a farmer

What type of farming do you practice? *(tick one or more boxes as appropriate)*

- ☐ Conventional farming ☐ Organic farming ☐ Conservation agriculture

What do you produce? *(tick one or more boxes as appropriate)*

- ☐ Field crops ☐ Mixed crop-livestock farming ☐ Arboriculture
☐ Livestock farming ☐ Market gardening ☐ Viticulture
☐ Horticulture

What is the size of your farm? *(tick one box - the unit is the hectare)*

- ☐ Less than 5 ha ☐ Between 50 and 100 ha
☐ Between 5 and 20 ha ☐ Between 100 and 200 ha
☐ Between 20 and 50 ha ☐ More than 200 ha

Section 1 – Your profile – You are an advisor, ONG, consultancy firm, farmers' union, technical agricultural institute

What type of agriculture do you work on? *(tick one or more boxes as appropriate)*

- ☐ Conventional farming ☐ Conservation agriculture
☐ Organic farming

What kind of production do you work on? *(tick one or more boxes as appropriate)*

- ☐ Field crops ☐ Mixed crop-livestock farming ☐ Arboriculture
☐ Livestock farming ☐ Market gardening ☐ Viticulture
☐ Horticulture

Section 1 - Your profile – You are a public authority

What organization do you work for? *(tick one box)*

- ☐ Community of municipalities, conurbation community, metropolis, urban community ☐ Department level (departmental directorate of territories)
☐ Town hall of a rural municipality ☐ Regional level (regional directorate of territories)
☐ Town hall of an urban municipality ☐ Ministry
☐ Public institution

Section 2 - Major soil threats – All stakeholders except from farmers, advisors and town hall of a rural municipality

On the scale on which you work, what do you think are the 3 main threats to soil? *(tick three boxes)*

- ☐ Erosion ☐ Decline in water storage capacity ☐ Artificialisation
☐ Loss of soil organic carbon ☐ Soil compaction ☐ Decline in soil biodiversity
☐ Loss of soil fertility ☐ Soil pollution ☐ I don't know

Section 2 - Major soil threats – You are a farmer

Are you experiencing erosion problems on your farm? *(tick one box)*

- ☐ Yes, very much ☐ Yes, a little ☐ Not at all
☐ Yes, relatively ☐ Not really ☐ I don't know

Are you experiencing problems of soil organic matter loss on your farm? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

On your farm, how important is the management of fertilising elements in production (N, P, K, etc)? *(tick one box)*

- | | | |
|---|---|---------------------------------------|
| ☐ Very important | ☐ Minor | ☐ I don't know |
| ☐ Important | ☐ Not at all important | |

On your farm, are you experiencing problems with water penetration and water reserves in your soils? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

Are you experiencing soil compaction problems on your farm? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

Are you experiencing soil pollution problems on your farm? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

Around your municipality, how significant is the problem of land loss through construction (roads, buildings, etc)? *(tick one box)*

- | | | |
|---|---|---------------------------------------|
| ☐ Very important | ☐ Minor | ☐ I don't know |
| ☐ Important | ☐ Not at all important | |

On your farm, how important is it to observe soil fauna (e.g. earthworms)? *(tick one box)*

- | | | |
|---|---|---------------------------------------|
| ☐ Very important | ☐ Minor | ☐ I don't know |
| ☐ Important | ☐ Not at all important | |

Section 2 - Major soil threats – You are an advisor

On the scale on which you work, are you experiencing erosion problems? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

On the scale on which you work, are you experiencing problems of soil organic matter loss? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

On the scale on which you work, are you experiencing problems of decline in soil fertility? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

On the scale on which you work, are you experiencing problems with water penetration and water reserves in the soils? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

On the scale on which you work, are you experiencing soil compaction problems? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

On the scale on which you work, are you experiencing soil pollution problems? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

On the scale on which you work, how significant is the problem of land loss through construction (roads, buildings, etc)? *(tick one box)*

- | | | |
|---|---|---------------------------------------|
| ☐ Very important | ☐ Minor | ☐ I don't know |
| ☐ Important | ☐ Not at all important | |

On the scale on which you work, how important is it to observe soil fauna (e.g. earthworms)? *(tick 1 box)*

- | | | |
|---|---|---------------------------------------|
| ☐ Very important | ☐ Minor | ☐ I don't know |
| ☐ Important | ☐ Not at all important | |

Section 2 - Major soil threats – You work in a town hall of a rural municipality

Are you experiencing erosion problems in your municipality? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

Are you experiencing problems with soil organic matter loss in your municipality? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

Are you experiencing problems of decline in soil fertility in your municipality? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

Are you experiencing problems with water penetration and water reserves in the soils in your municipality? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

Are you experiencing soil compaction problems in your municipality? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

Are you experiencing soil pollution problems in your municipality? *(tick one box)*

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ☐ Yes, very much | ☐ Yes, a little | ☐ Not at all |
| ☐ Yes, relatively | ☐ Not really | ☐ I don't know |

How significant is the problem of land loss through construction (roads, buildings, etc) in your municipality? *(tick one box)*

- | | | |
|---|---|---------------------------------------|
| ☐ Very important | ☐ Minor | ☐ I don't know |
| ☐ Important | ☐ Not at all important | |

How important is it to observe soil fauna (e.g. earthworms) in your municipality? *(tick one box)*

- | | | |
|---|---|---------------------------------------|
| ☐ Very important | ☐ Minor | ☐ I don't know |
| ☐ Important | ☐ Not at all important | |

Section 3 - Your access to knowledge on soil – All stakeholders

How would you rate your level of knowledge on soil? *(tick one box)*

- | | |
|--|--|
| ☐ I am an expert | ☐ I know a few things |
| ☐ I have good knowledge | ☐ I don't know anything |

Which sources do you used to access soil knowledge? *(tick one box per line)*

	Used	Little used	Not used
Social networks	☐	☐	☐
Electronic newsletters	☐	☐	☐
Web pages and blogs	☐	☐	☐
Printed media	☐	☐	☐
Scientific literature	☐	☐	☐
Technical literature	☐	☐	☐
Technical reports	☐	☐	☐
Peer-to-peer groups	☐	☐	☐
Agricultural advisory services	☐	☐	☐
Other	☐	☐	☐

How would you rate your access to soil knowledge? *(tick one box)*

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ☐ Sufficient | ☐ Insufficient |
| ☐ Average | ☐ Hard to say |

Is the knowledge you have access to adapted to your needs? *(tick one box)*

- | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| ☐ Yes, very | ☐ Not really | ☐ Hard to say |
| ☐ Average | ☐ Not at all | |

How would you describe the sharing of knowledge between soil-related stakeholders? *(tick one box)*

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ☐ Sufficient | ☐ Insufficient |
| ☐ Average | ☐ Hard to say |

In your opinion, what are the main barriers to access soil knowledge? *(tick one to three boxes)*

- | | |
|--|--|
| ☐ Training not adapted (format, content) | ☐ Lack of connection between stakeholders |
| ☐ Lack of training for stakeholders on how to communicate | ☐ Lack of time |
| ☐ Lack of structures that share knowledge | ☐ Cost of training |
| | ☐ I don't know/Hard to say/Other |

In your opinion, what are the main opportunities for promoting access to knowledge? *(tick one to three boxes)*

- | | |
|--|---|
| ☐ Identify training content needs | ☐ Promote appropriate sharing |
| ☐ Promote participatory research | ☐ Promote knowledge at the territorial level |
| ☐ Support the development of demonstration activities | ☐ I don't know/Hard to say/Other |
| ☐ Enable all funded projects to share their results | |

In your opinion, which exchange network should be strengthened? *(tick two boxes)*

- | | |
|---|---|
| ☐ Peer to peer network | ☐ Farm advisor - science network |
| ☐ Farmers - advisors network | ☐ Policy - science network |
| ☐ Farmers - policy network | ☐ Policy - Society network |
| ☐ Farmers - science network | ☐ Science - society network |
| ☐ Farmers - society network | ☐ I don't know/Hard to say/Other |

Annexe D

Suppléments de l'article (*chapitre 5*) sur les projets de « citizen science » sur les sols agricoles

Questionnaire envoyé aux acteurs

What is this questionnaire about?

The main objective of this questionnaire is to carry out a synthesis to assess the current understanding and use of citizen science approaches for knowledge building and for climate smart sustainable agricultural soil management across Europe. The synthesis will review European soil citizen science based on collected examples of past and current citizen science initiatives for agricultural soil management that exist in the European Joint Programme SOIL partner countries. We encourage soil citizen science project coordinators (or co-coordinators) and persons that are not yet using citizen science approaches in their work (citizen science novices) to fill in the questionnaire. The outcomes of the synthesis will be reported as a milestone (MS116: draft report on synthesis of knowledge and use of citizen science across Europe) in December 2022. The final report will be due in May 2023 as D2.14 "Report on synthesis of knowledge and use of citizen science across Europe". This synthesis is led by AGES and co-lead by INRAE.

What is EJP SOIL? INFOBOX

EJP SOIL (<https://ejpsoil.eu/>) is a European Joint Programme Cofund on Agricultural Soil Management contributing to key societal challenges including climate change, water and future food security. The EJP SOIL consortium consists of 26 partners from 24 countries ensuring a large representation of European countries. The main aim of EJP SOIL is to develop a sustainable framework for an integrated community of researchers working on related aspects of agricultural soil management. The major aspects of knowledge on agricultural soil management to be addressed are:

- Strengthen the European research community on agricultural soil management through a concerted alignment of research, training, and capacity building;
- Co-construct a roadmap for agricultural soil research with stakeholders;
- Fill the identified knowledge gaps by fostering research projects and synthesis through the organization of internal and external calls;
- Build human and institutional research capacity through targeted training and network building;
- Create harmonised soil information systems and foster their contribution to reporting through a combination of methodological transnational activities and research projects using geodatabases and combining soil information databases with remote sensing and models; and
- Support European policies on agriculture and climate by providing a scientific underpinning.

To clarify, below are the different terms used in this questionnaire:

- Scientist: A person who is trained in a science and whose job involves doing scientific research or solving scientific problems
- Citizen scientist: A member of the general public who collects and analyses data relating to the natural world, typically as part of a collaborative project with professional scientists. A citizen scientist can also be a person who co-build projects with scientists that consider different type of knowledge (scientific and empirical ones) taken into account for emerging research questions, new issues around data, or new integrated knowledge
- Citizen science: The collection, analysis and publication of data relating to the natural world, in this case agricultural soils, by members of the general public, typically as part of a collaborative project with scientists. Citizen Science can be seen as the involvement of volunteers in science.

Where do you work (primarily)?

- | | |
|--|--|
| ☐ School | reserve, biosphere reserve, environmental agency etc.) |
| ☐ University/College | ☐ Association/Society/NGO |
| ☐ Research institute/Applied research institute | ☐ Governmental administrative office |
| ☐ Botanical garden/zoological garden/institution | ☐ Private person/private community of interests |
| ☐ Administrative office of nature-protection (national park, nature | ☐ Business company |
| | ☐ Foundation |
| | ☐ None of the above, but: |

Are you familiar with the concept of citizen science?

- | | |
|---|--|
| ☐ No, I have never heard of that | ☐ Yes, I know what citizen science is |
| ☐ Yes, I have heard that term before | |

Have you (co-)organized a citizen science project?

- ☐ Yes, I have (co-)organized such a project
- ☐ Yes, I have organized the participation of citizen scientists (a school class/other learner...) in such a project
- ☐ No, I have never (co-)organized such a project or integrated it in my research/education work

If yes, go to questions for citizen science coordinators.

If not, go to the questions for citizen science novices.

Project basics (coordinators)**Name and acronym of the citizen science project:****Involved country(ies):** *(multiple response possible)***Scale of the project:**

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| ☐ Local | ☐ National | ☐ Global |
| ☐ Regional | ☐ European | |

Contact of coordinator

- | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------------|
| ☐ Name: | ☐ Organisation: | ☐ Email: |
|--------------------------------|--|---------------------------------|

Project information

- | | |
|---|---|
| ☐ Other organisations involved in the project: | ☐ When did your project start? |
| ☐ Website of the project: | ☐ How long does the project run? |

Is the project duration limited?

- | | |
|------------------------------|-----------------------------|
| ☐ Yes | ☐ No |
|------------------------------|-----------------------------|

If duration=yes

Why is the duration limited? *(multiple response possible)*

- | | |
|---|--|
| ☐ End of funding | ☐ We have achieved our scientific goals |
| ☐ Difficulties to maintain the user' network | ☐ Scientists are no more involved |
| | ☐ Other, please specify: |

Budget and funding**What was/is the budget of the project?**

- | | |
|---|---|
| ☐ < 49.999€ | ☐ 100.000-499.000€ |
| ☐ 50.000-99.000€ | ☐ > 500.000€ |

Who was/is funding your project? (multiple response possible)

- | | |
|--|--|
| ☐ A foundation/NGO/association | ☐ European funding (H2020, Commission, ...) |
| ☐ National research funding agency | ☐ Other(s), please specify: |
| ☐ National agricultural or environmental funding agency | |

Is there a cost for a citizen scientist for contributing to your project? If yes, how much is it?

Ten principles of citizen science INFOBOX

Citizen science is a flexible concept which can be adapted and applied within diverse situations and disciplines. The European Citizen Science Association (ECSA) has developed some key principles to provide a best practice guideline to what makes good citizen science (<https://zenodo.org/record/5127534#.Yl-tiKozY2x>):

10 principles of citizen science (coordinators)

How were/are the citizen scientists actively involved in the project? (multiple response possible)

- | | |
|---|---|
| ☐ As contributors | ☐ As project leader or co-leader |
| ☐ As collaborators | |

Project information

What were/are the scientific objectives of the project?

What was/is the genuine science outcome of the project?

What were/are the benefits for the scientists for taking part? (multiple response possible)

- | | |
|---|--|
| ☐ Publication of research outputs, please cite them: | ☐ Satisfaction through contributing to scientific evidence (e.g. to address local, national and international issues) |
| ☐ Learning opportunities | ☐ The potential to influence policy |
| ☐ Personal enjoyment | ☐ I don't know/no answer |
| ☐ Social benefits | |

And what were/are the benefits for the citizen scientists in taking part? (multiple response possible)

- | | |
|---|--|
| ☐ Publication of research outputs, please cite them: | ☐ Satisfaction through contributing to scientific evidence (e.g. to address local, national and international issues) |
| ☐ Learning opportunities | ☐ The potential to influence policy |
| ☐ Personal enjoyment | ☐ I don't know/no answer |
| ☐ Social benefits | |

In how many stages of the project were/are the citizen scientists involved? (multiple response possible)

- | | |
|---|---|
| ☐ Developing the research question | ☐ Gathering and analysing data |
| ☐ Designing the method and the protocols | ☐ Communicating the results |
| | ☐ Other, please specify: |

How did/do the citizen scientists receive feedback from the project? (multiple response possible)

- | | |
|---|---|
| ☐ Personal support | ☐ Newsletter |
| ☐ Workshop | ☐ By phone |
| ☐ Website | ☐ Other, please specify: |
| ☐ Facebook | |

What were/are the research challenges in your project? (random)

Please rate on a scale from 1 to 6, where 1 means 'strongly disagree' and 6 'strongly agree'.

	Strongly disagree 1	2	3	4	5	Strongly agree 6	Don't know (yet)
Lack of expertise in education/didactics within project team	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Lack of expertise within the project team	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Low number of participants in the project	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Participants of the project overtaxed by tasks	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Low endurance of participants	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Deficient data quality	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Results different from what was expected	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Project very time consuming	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Insufficient staff resources	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Funding denied	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Funding temporary	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Insufficient financial resources in general	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Lack of recognition within scientific community	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Scientists have little interest in collaboration	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
NGOs have little interest in collaboration	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
No access to scientific literature	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Scientific literature too complex	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Were the project results and meta-data published in an open access format?

If yes, please give reference(s) and doi(s):

Were the results (the newly generated knowledge) published? (random)

Yes, no or planned?

	Yes	No	Planned
Press, newspaper, magazine	☐	☐	☐
Scientific peer-reviewed journal	☐	☐	☐

Report	☐	☐	☐
Radio	☐	☐	☐
Website	☐	☐	☐
Video	☐	☐	☐
TV	☐	☐	☐
Flyer	☐	☐	☐
Social media (Facebook, Twitter, etc.)	☐	☐	☐

Were the project research data and meta-data merged with other database (national, research infrastructure)?

If yes, which one(s)?

Have the citizen scientists been acknowledged in the project results and publications?

If yes, how?

If no, why not?

Has the citizen science project been evaluated for its ... (random)

Yes, no or planned?

	Yes	No	Planned
scientific output	☐	☐	☐
data quality	☐	☐	☐
participant experience	☐	☐	☐
societal impact	☐	☐	☐
policy impact	☐	☐	☐

Have you taken into consideration the following impacts of your activities? (random)

Yes, no or planned?

	Yes	No	Planned
Legal and ethical issues surrounding copyright	☐	☐	☐
Intellectual property	☐	☐	☐
Data sharing agreements	☐	☐	☐
Confidentiality	☐	☐	☐
Attribution	☐	☐	☐
Environmental impact	☐	☐	☐

How was/is data quality ensured?

Please tell us, who?

... were/are the citizen scientists involved in your project?

... were/are the partners/structures in society involved in building your citizen science approach?

... were/are the partners/structures involved as communicators between your project and society?

Who did/does what in the project? (multiple response possible)

	Not part of the project	Citizen scientist	Project coordinator(s)	Scientist(s)	Other persons
Define research question	☐	☐	☐	☐	☐

Background (literature) research	☐	☐	☐	☐	☐
Apply for funding	☐	☐	☐	☐	☐
Develop study design –included the definition of the protocols	☐	☐	☐	☐	☐
Logistical planning	☐	☐	☐	☐	☐
Collect data/samples	☐	☐	☐	☐	☐
Sample analysis/categorisation/interpretations	☐	☐	☐	☐	☐
Data analysis	☐	☐	☐	☐	☐
Result interpretation	☐	☐	☐	☐	☐
Publication of results in other media	☐	☐	☐	☐	☐
Implement/apply results	☐	☐	☐	☐	☐

EJP SOIL and SOIL Mission related (coordinators)

A Soil Deal for Europe INFOBOX

EU Missions are a novelty of the Horizon Europe research and innovation programme for the years 2021-2027. They will deliver impact by putting research and innovation into a new role, combined with new forms of governance and collaboration, as well as by engaging citizens. The main goal of the Mission 'A Soil Deal for Europe' is to establish 100 Living Labs and Lighthouses to lead the transition towards healthy soils by 2030.

Which kind of agricultural soil system was/is being studied? *(multiple response possible)*

- | | |
|--|--|
| ☐ Croplands | ☐ Grassland |
| ☐ Mixed systems (crop-animal) | ☐ Urban or urban-countering gardening |
| ☐ Arboriculture | ☐ All (or any agricultural system) |
| ☐ Vineyards | ☐ Other, please specify: |
| ☐ Fruit and vegetables | |

Which soil health related data has your project generated (or will generate)? *(multiple response possible)*

- | | |
|--|---|
| ☐ Presence of soil pollutants | ☐ Soil biodiversity |
| ☐ Excess nutrients and salts | ☐ Soil nutrients and pH |
| ☐ Soil organic carbon | ☐ Vegetation cover |
| ☐ Soil structure including bulk density and the absence of soil sealing and erosion | ☐ Landscape heterogeneity |
| | ☐ Other (e.g. pH, pedology), please specify: |

Auto-analysis of your project (coordinators)

At which level of citizen science do you think to be currently?

- ☐ Level 1 – Crowdsourcing – citizen scientists contribute to collect soil data
- ☐ Level 2 – Distributed intelligence – citizen scientists contribute to interpret soil data
- ☐ Level 3 – Participatory science – citizen scientists contribute to define the questions and data collecting
- ☐ Level 4 – Extreme Citizen Science - The research is really a collaborative one at all steps (define the questions, collect the data, analyse the data)

Which of the following prerequisites would be important for your citizen science work?

(random)

Please rate on a scale from 1 to 6, where 1 means 'not important' and 6 'very important'.

	Not important:					Very important:	Don't know (yet)
	1	2	3	4	5	6	
More staff resources	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

More financial resources	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Contact persons for CS at scientific institutions	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Offers for training in CS	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Offers for guidance for CS projects	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Offers for networking with CS community	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Guiding materials for CS	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
More recognition from academia for CS	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
More recognition within my own organisation for CS	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

From your point of view, what were/are the factors of success for your citizen science project?
(random)

Please rate on a scale from 1 to 6, where 1 means 'not at all' and 6 'very strong'.

	Not available	Not at all: 1	2	3	4	5	Very strong: 6	Don't know (yet)
Enthusiasm of the participants for CS	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Collaboration with experts outside my organisation	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Experts for science/environment in the project team	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Experts for education/didactics in the project team	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sufficient staff resources	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sufficient financial resources	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Additional teaching lessons for participants	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Adequate facilities	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Simple project design	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Technology for data collection	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Professional public relations work	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Intensive communication with participants	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
High number of participants	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Citizen science novices

Do you think that citizen science can be successfully integrated in extracurricular education formats (e.g. by NGOs, museums, etc.)? *(random)*

Please rate on a scale from 1 to 6, where 1 means 'no, definitely not' and 6 'Yes, sure'.

	No: 1	2	3	4	5	Yes, sure: 6	Don't know (yet)
With children/adolescents	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
With adults	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Do you think that citizen science projects can be successfully integrated into school teaching – with the students as citizen scientists?

	No: 1	2	3	4	5	Yes, sure: 6	Don't know (yet)
	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Would you yourself be interested in using a citizen science approach in your work in the future?

	No : 1	2	3	4	5	Yes, sure: 6	Don't know (yet)
	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Which of the following prerequisites would motivate you to conduct a citizen science project in the future? *(random)*

Please rate on a scale from 1 to 6, where 1 means 'not important' and 6 'very important'.

	Not important: 1	2	3	4	5	Very important: 6	Don't know (yet)
More staff resources	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
More financial resources	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Contact persons for CS at scientific institutions	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Offers for training in CS	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Offers for guidance for CS projects	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Offers for networking with CS community	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Guiding materials for CS	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
More recognition from academia for CS	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
More recognition within my own organisation for CS	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Do any conditions with respect to your working environment speak against starting citizen science activities? *(random)*

Please rate on a scale from 1 to 6, where 1 means 'no, not at all' and 6 'yes definitely'.

	No, not at all: 1	2	3	4	5	Yes definitely: 6	Don't know (yet)

Lack of time	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Lack of financial resources	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Lack of staff resources	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Don't know how to find partners	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Do not have the autonomy to initiate such a project on my own	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Do any of these personal conditions speak against starting citizen science activities? (random)

Please rate on a scale from 1 to 6, where 1 means 'no, not at all' and 6 'yes definitely'.

	No, not at all: 1	2	3	4	5	Yes definitely: 6	Don't know (yet)
I lack the necessary knowledge	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Doesn't fit my working style	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Science is not relevant for my work	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
I shy from the high workload	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Doesn't fit my personality	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Do any of these doubts speak against starting citizen science activities? (random)

Please rate on a scale from 1 to 6, where 1 means 'no, not at all' and 6 'yes definitely'.

	No, not at all: 1	2	3	4	5	Yes definitely: 6	Don't know (yet)
Don't think this is the best method to achieve scientific/ educational goals	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
I doubt that participants would have fun	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
I doubt that participants would have discipline	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
I doubt that participants would have the necessary skills (yet)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
I am not convinced of citizen science in general	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Liste des projets de « citizen science » identifiés

Nom et acronyme des projets de « citizen science » mentionnés par les répondants
500 ENI monitoring program
AGROforestry and MIXed farming systems - Participatory research to drive the transition to a resilient and efficient land use in Europe - AGROMIX
Beweisstueck Unterhose/ Proof by Underpants
Biologische Aktivitaet in Boeden – Messungen in Zusammenarbeit mit oesterreichischen Schulen (TEATIME4SCHOOLS)
CiDéSol
Clés de sol - in French (Keys of soil)
CurieuzeNeuzen in de tuin (CNIDT)
De Bodemdierendagen.nl (soilanimaldays)
Earthworm Watch
Entwicklung einer Bildungs-App aufgrund der bestehenden Tea Bag Index-Methode (TeaTime4App)
Environmental monitoring projects
GROW Citizen Research Experiments
Jardibiodiv
Societas pedologica slovacica
Landsense
LeguCon
Life in Undies (Alsóban az élet)
Observatoire Agricole de la Biodiversité (OAB)
QUBS Participatory monitoring of soil biological quality
Solenville
Sustainable Training Programme (STP) Tiny Forest and Soil Health Toolkit
teatime4science, tepåsefoersoeket, teatales
The Tea Bag Index - UK (TBI-UK)

Annexe E

Présentation des initiatives SMS (*Soil Mission Support*) et EJP SOIL (*European Joint Programme on Soil*) dans lesquels s'inscrivent mes articles

Pendant mes 4 ans et demi passés à l'INRAE, j'ai été impliqué dans le programme EJP SOIL (*European Joint Programme on Soil*) et dans le projet SMS (*Soil Mission Support*).

Le programme EJP SOIL (*European Joint Programme on Soil*) représente une initiative majeure dans le domaine de la recherche sur les sols agricoles en Europe. D'une durée de 5 ans (2020-2025) et financé par le programme-cadre Horizon 2020 de l'Union européenne, ce programme vise à promouvoir la collaboration entre les différents acteurs de la recherche sur les sols en Europe. Son objectif principal est de coordonner les efforts de recherche pour améliorer la compréhension des fonctions des sols agricoles, de leur gestion et de leur utilisation durable, ainsi que de favoriser l'innovation dans les pratiques agricoles, la protection de l'environnement et la lutte contre le changement climatique. Les activités du programme EJP SOIL englobent des projets de recherche fondamentale et appliquée, le développement de nouvelles technologies et méthodologies, ainsi que l'établissement de réseaux de collaboration entre les chercheurs, les praticiens et les décideurs (Figure 1A). Ces efforts visent à renforcer la base de connaissances sur les sols agricoles en Europe et à fournir des solutions concrètes aux défis actuels liés à leur gestion et leur préservation. Dans le cadre de ce projet, j'ai apporté ma contribution à plusieurs Work Packages : le WP2, dédié à l'élaboration d'une feuille de route, le WP6, axé sur le soutien à l'harmonisation des informations sur les sols, et le WP7, consacré à la synthèse et à l'intégration des connaissances. Ces travaux ont notamment donné lieu aux publications suivantes :

WP2	- Mason, E., Gascuel-Oudou, C., Aldrian, U., Sun, H., Miloczki, J., Götzinger, S., Burton, V.J., Rienks, F., Di Lonardo, S., & Sandén, T. (2024). <i>Participatory soil citizen science: An unexploited resource for European soil research</i> . <i>European Journal of Soil Science</i> , e13470. https://doi.org/10.1111/ejss.13470
WP6	- Mason, E., Cornu, S., Arrouays, D., Fantappiè M., Jones, A., Götzinger, S., Spiegel, H., Oorts, K., Chartin, C., Borůvka, L., Pihlap, E., Putku, E., Heikkinen, J., Boulonne, L., Poeplau, C., Marx, M., Tagliaferri, E., Vinci, I., Leitans, L., Armolaitis, K., van Egmond, F., Kobza, J., Wetterlind, J., Drobnik, T., Hirte, J., & Bispo, A. (2025). <i>Monitoring systems of agricultural soils across Europe in regards of the upcoming European Soil Monitoring Law</i> . Article en préparation. - Mason, E., Froger, C., Bispo, A., Fantappiè, M., Hessel, R., Van Egmond, F., Wetterlind, J., Smerczak, B., Bakacsi, Z., & Chenu, C. (2023). <i>Policy brief on soil monitoring systems: challenges / recommendations towards harmonization</i> . https://doi.org/10.17180/RVXN-JA42.4hal-04299599v2

WP7	- Mason, E., Cornu, S., & Chenu, C. (2023). <i>Stakeholders' point of view on access to soil knowledge in France. What are the opportunities for further improvement?</i> <i>Geoderma Regional</i>, 35, e00716. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00716 - Mason, E., Cornu, S., & Chenu, C. (2024). <i>Point de vue des acteurs sur l'accès à la connaissance sur les sols en France. Quelles améliorations possibles ?</i> <i>Étude et Gestion des Sols</i>, 31, pp.123-140. hal-04487729 - Mason, E., Cornu, S., Froger, C., Saby, N.P.A., & Chenu, C. (2024). <i>Scientific indicators and stakeholders' perceptions on soil threats in France: how do they compare?</i> <i>Article soumis pour publication.</i>
------------	--

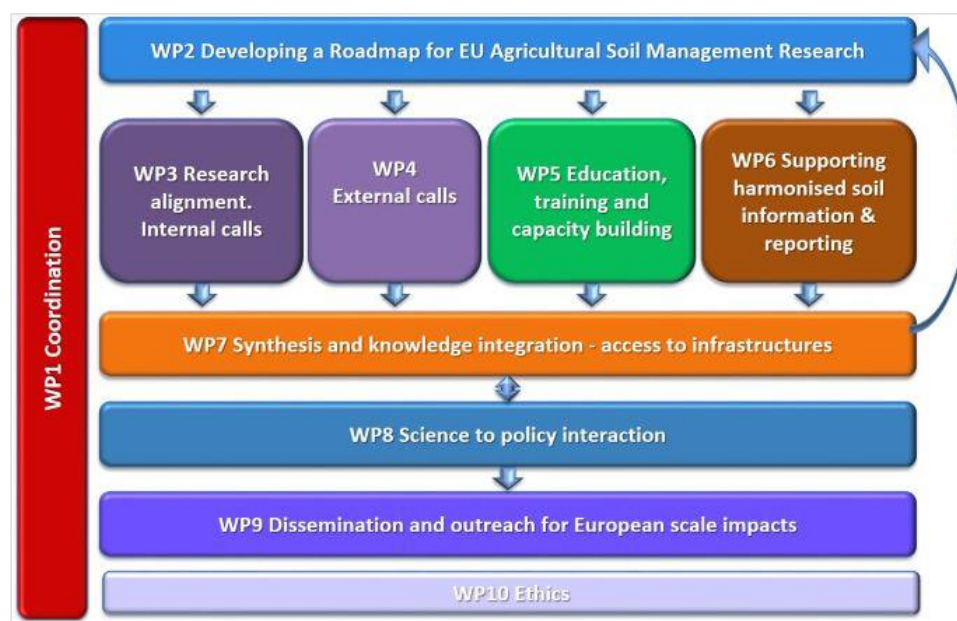


Figure A1 : Organisation de l'EJP SOIL en dix work packages, répondant à des besoins spécifiques et des objectifs définis.

Le projet H2020 Soil Mission Support (SMS) constitue une autre initiative importante permettant d'élargir les problématiques abordées aux sols non-agricoles. Ses domaines d'action du projet s'étendaient de l'agriculture et de la foresterie, à l'aménagement du territoire, la réhabilitation des sols, l'adaptation au changement climatique et à la prévention des catastrophes naturelles. D'une durée de deux ans (2020-2022), le projet SMS était porté par un consortium de dix organisations partenaires, dont INRAE, travaillant dans le domaine de la gestion des sols dans sept pays européens. Avec pour objectif de favoriser la transition vers une gestion durable des sols, le projet SMS visait à évaluer les activités de recherche et d'innovation actuelles, à identifier les lacunes en matière de connaissances et à élaborer une feuille de route pour la recherche et innovation en Europe (Figure A2). Dans le cadre de ce projet, j'ai contribué au Work Package 2 (WP2), dédié à l'évaluation des activités de R&I et à l'identification des lacunes. Mon rôle consistait à identifier les connaissances existantes ainsi que les acteurs clés de la recherche et de l'innovation sur les sols en Europe. J'ai également recensé des projets modèles, tels que les Living Labs, pour illustrer des solutions innovantes ou déjà mises en œuvre. Cette contribution a notamment abouti à la publication suivante :

- Mason, E., Bispo, A., Matt, M., Helming, K., Rodriguez, E., Lansac, R., Carrasco, V., Rafiul, M., Verdonk, L., Prokop, G., Wall, D., Francis, N., Laszlo, P., & Löbmann, M. (2023). *Sustainable soil and land management: a systems-oriented overview of scientific literature*. *Frontiers in Soil Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1268037>

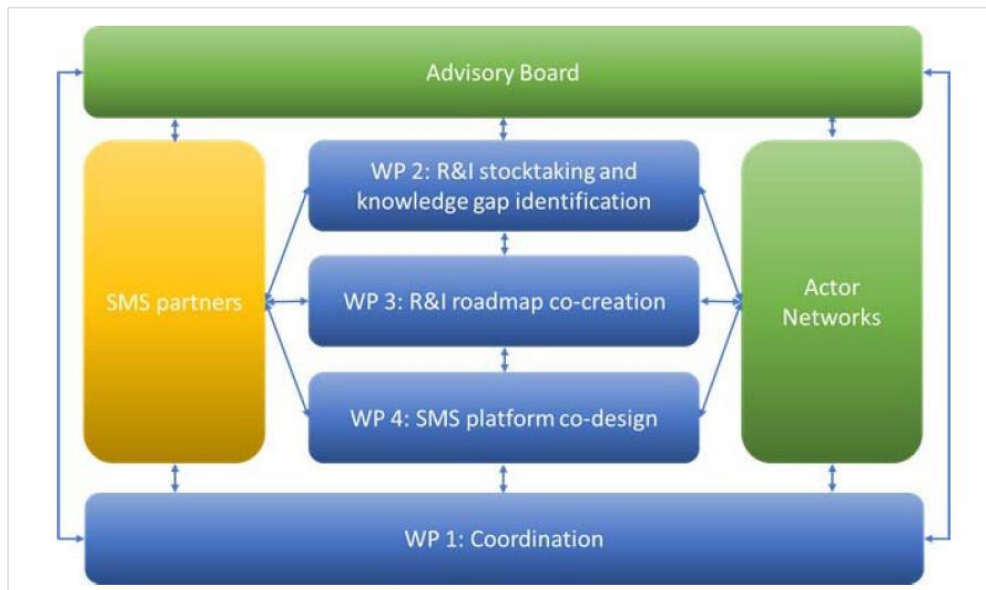


Figure A2 : Organisation du projet SMS en dix work packages et ses relations avec les réseaux d'acteurs.

Annexe F

Stakeholders' point of view on access to soil knowledge in France. What are the opportunities for further improvement?

Cet article, publié en anglais dans *Geoderma Regional*, est présenté ici en version originale pour référence. La traduction en français de l'article est intégrée dans le corps principal de la thèse (chapitre 4).

ABSTRACT

Life on earth depends on soil health. However, soils are threatened across the world. To respond to the challenges posed by climate change and soil degradation, there is a need to better integrate scientific soil knowledge into the practice. The aim of this paper is to better understand the access to soil knowledge in France and identify opportunities for further improvement, with a particular focus on the difference of point of view between six categories of stakeholders. This study is based on 1951 responses from a participatory stakeholders' consultation we conducted in France. Our results showed that most stakeholders considered the knowledge they have access to as not adapted to their needs. They also expressed that knowledge sharing between stakeholders was not sufficient. To improve access to soil knowledge, stakeholders suggested adapting at the territorial level the content of soil knowledge shared and transferred, as well as improving ways of sharing and transferring soil knowledge. Additionally, stakeholders valued different exchange networks based on their type of knowledge. Stakeholders with more theoretical soil knowledge (public authorities, NGOs, researchers) stated being more interested in networks between policy, science and society. However, networks with farmers and advisors were more favored by stakeholders with empirical soil knowledge. Considering our findings, in order to strengthen knowledge transfer and sharing, we encourage the promotion of the profession of scientific mediator, as well as the implementation of Living Labs and Lighthouse farms to bring together various stakeholders at a local level towards innovation, training and education. This will ensure a transition towards a more sustainable soil management in Europe.

Keywords

EJPSOIL; Exchange networks; Knowledge sharing; Knowledge transfer; Multi-actor consultation; Soil health; Stakeholder perspective

INTRODUCTION

Life on earth depends on soil health. Soil provides a number of essential services, such as provisioning (food, fibers and fuel), regulating (air quality and water purification), supporting (soil formation and nutrient cycling), and cultural services (recreation and aesthetic value) (Dominati et al., 2014). However, soils are threatened all over Europe and globally due to a number of factors. The demand for food, fibers and fuel has been steadily increasing leading to an ever-growing pressure on soil and land resources (Popp et al., 2014). Additionally, soil and land degradation has increased, caused amongst others by unsustainable management practices in agriculture and forestry, contamination and soil sealing due to urbanization and infrastructure development (Veerman et al., 2020). Worldwide, at least one third of the soils are considered as moderately to heavily degraded (FAO & ITPS, 2015). It reaches 60 to 70 % of the European soils (Veerman et al., 2020). To prevent further degradation, it is essential to implement sustainable soil management practices, such as proper land management, crop rotation, and the use of organic fertilizers (Lal et al., 2021). This will not occur unless greater awareness and education on the importance of soil health and the consequences of unsustainable practices are implemented in order to ensure that soils are healthy and productive for future generations (Bouma, 2019).

Soil science research is therefore essential for understanding and addressing the complex challenges that are faced in the current agricultural landscape. However, to effectively bridge the gap between our current state of knowledge and societal needs, a joint effort involving a diverse set of stakeholders is required (Mol & Keesstra, 2012). This includes researchers, public authorities, farmers, and other stakeholders who all have a role to play in advancing soil science research and translating it into meaningful solutions. It is important to consider the point of view of these stakeholders and their level of soil knowledge. The European Joint Soil Programme 'Towards climate-smart and sustainable agricultural soil management' (EJP SOIL, 2020-2025) is a major initiative of the European Union to develop an integrated European system of sustainable agricultural soil research. EJP SOIL is dedicated to optimize the soil knowledge management life-cycle (adapted after Dalkir, 2005). This includes activities such as (i) knowledge development; (ii) harmonization, organization and storage of knowledge; (iii) knowledge sharing and transfer; and (iv) knowledge application. To achieve these objectives, the initiative takes a participatory approach which relies on the collaboration between scientists from 24 European countries who hold different interests in soil-related topics, and stakeholders from both a national and regional level. Stakeholders' consultations represent an effective tool to identify critical aspects in the knowledge life-cycle, to ensure that soil science can best meet the needs of society (Richer-de-Forges et al., 2019). Through stakeholders' consultations, stakeholders can provide valuable input on how to improve the knowledge system and maximize its potential.

A stakeholder consultation in 20 countries within the EJP Soil consortium was conducted to identify and prioritize the main barriers and opportunities for soil knowledge at a national and European level (Heller et al., 2021; Ruysschaert et al., 2021; Vanino et al., 2022; Vanino et al., 2023). Stakeholders' points of view on how to optimize the life-cycle management of soil knowledge were explored and compared between countries. Findings from Vanino's study (2023) clearly suggest that, across Europe, an increase in research funding and the strengthening of exchange networks and interlinked national and European infrastructures can contribute to

the creation of healthy, resilient and sustainable soil ecosystems. To get a deeper insight of the difference of point of view between categories of stakeholders, we performed a complementary large-scale survey with a focus on six categories of stakeholders, taking France as an example.

The overall aim of this paper is to better understand the access to soil knowledge in France and identify opportunities for further improvement, with a particular focus on the difference of point of view between six categories of stakeholders, i.e. public authorities, NGOs, researchers, farmers, advisors and agricultural schools. To achieve this, we conducted a participatory stakeholders' consultation. We considered stakeholders' level of soil knowledge and the sources used to access soil knowledge. We also explored opportunities and exchange networks to strengthen in order to increase stakeholders' access to soil knowledge. By doing this, we provide a comprehensive overview of the existing access to soil knowledge in France, and suggest ways to improve it.

MATERIAL AND METHODS

Questionnaire design and dissemination

A participatory stakeholders' consultation was conducted. Targeted stakeholders were: farmers, public authorities (i.e. from the municipality, departmental and regional level, and ministries), scientific researchers, NGOs, advisors, and agricultural schools (i.e. high schools and higher education). The questionnaire (**Annex C**) was designed to collect stakeholders' point of view on the access to soil knowledge in France and more specifically on: i) stakeholders' level of soil knowledge; and ii) ways to improve stakeholders' access to soil knowledge. The questions and the framing of the questions were based on the EJP SOIL guidelines (Thorsøe, 2021) and modified to suit the French context. Multiple choice questions were asked to the stakeholders. The questionnaire, in French, started with a range of questions used to define the profile of the respondents (stakeholder's category including for farmers the agriculture type, i.e. organic farming, conventional farming and conservation agriculture, and the type of production, i.e. field crops, livestock or mixed crop-livestock farming, market gardening, and perennial crops; age; department; education level). Secondly, stakeholders were asked to estimate their level of knowledge on soil as well as their access to soil knowledge with a choice of "insufficient", "medium" or "sufficient". Thirdly, two questions addressed whether stakeholders considered that soil knowledge was adapted to their needs and whether the knowledge sharing among stakeholders was satisfying. Fourth, the sources used to access soil knowledge were asked for. Options were given: "social networks", "electronic newsletters", "web pages & blogs", "printed media", "scientific literature", "technical reports", "peer-to-peer groups", and "agricultural advisory services". Fifth, stakeholders were asked to identify six barriers ("cost of training", "lack of time", "lack of connection between stakeholders", "lack of structures that share knowledge", "lack of training on how to communicate", and "lack of adapted training") and six opportunities to access to soil knowledge ("promote participatory research", "enable all funded projects to share their results", "identify training content needs", "support the development of demonstration activities", "promote appropriate sharing", and "promote knowledge at the territorial level"). Finally, stakeholders were asked to opt for two exchange networks to be strengthened out of a list of nine in order to increase stakeholders'

access to knowledge: “policy-society”, “science-society”, “policy-science”, “farmer-society”, “farmer-policy”, “farmer-science”, “peer-to-peer”, “advisor-science”, and “farmer-advisor”. The questionnaire was first tested on a sample of various stakeholders and was adjusted according to feedback. The questionnaire took about 15 minutes to be answered. The study was carried out from December 2020 to September 2021 using an online survey tool and disseminated by various means (via networks, direct contact, via advisors for farmers, etc.).

Data analysis

A total of 2,202 visitors to the survey were registered. During data preparation, we excluded all cases in which the respondents had answered less than 80% of the questions. We included only respondents who were part of our list of targeted stakeholders. This left us with 1,951 cases for analysis.

To ensure the representativeness of our response sample per category of stakeholder, we used a saturation approach. A sampling is considered representative when the contribution of new observations (in our case responses to the questionnaire) does not modify the results previously obtained (Savoie-Zajc, 2007). We compared results gathered until June 2021 (1,610 responses) to results gathered in September 2021, our up-to-date data set of 1,951 responses. As there was no significant difference in the results between the two dates, we considered our sampling as representative. In addition, Ramsey & Hewitt (2005) considered that above 350 responses a category is reasonably represented, which is the case for advisors and farmers.

In order to identify relationships between answers and stakeholders’ categories, a correspondence analysis (CA) was performed for each question or group of questions and for stakeholders’ categories with more than eight occurrences. To identify similarities among different stakeholders’ categories, an agglomerative hierarchical cluster analysis (AHC) was performed on the two first components of the CA. All statistical analyses were performed using the XLSTAT software (Addinsoft, 2016).

RESULTS

Characterization of survey respondents

37% of the 1,951 responses came from farmers (720 responses), 20% from advisors (383), 18% from public authorities (352) (Figure A3a). Other stakeholders’ categories, such as agricultural schools (10%, 206), researchers (10%, 198) and NGOs (5%, 92) were less represented. For the category public authority, the more local the level was, the higher the number of responses, with 47% of public authorities from the municipality level (165 responses) and 10% from ministries (11, Figure A3b). Considering the agriculture type, organic farming (41%, 295) was the most represented, followed by conventional farming (40%, 289) and conservation agriculture (30%, 215) (Figure A4a). Considering the type of production, responses were more heterogeneous with 261 answers for livestock or mixed crop-livestock farming (35%), followed by field crops (34%, 250), perennial crops (20%, 147) and then market gardening (11%, 85) (Figure A5).

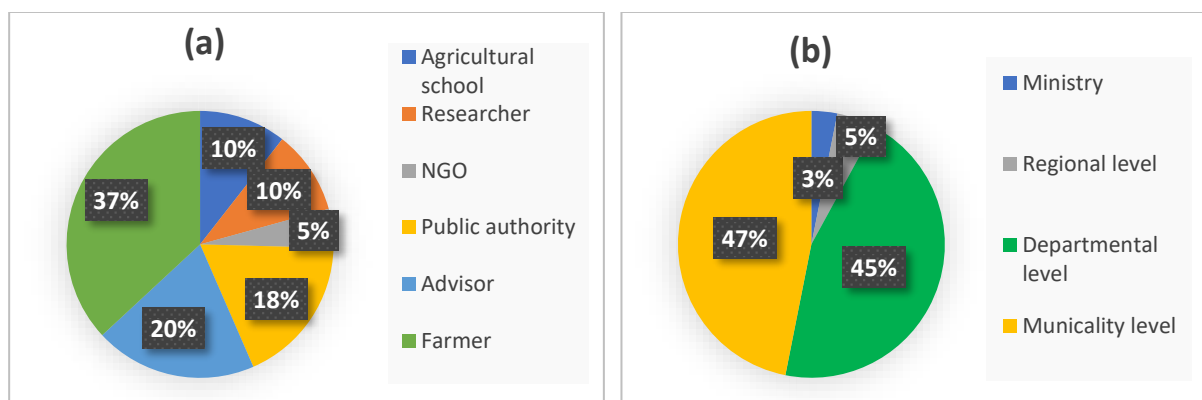


Figure A3: Distribution of respondents in percentage per category of stakeholder (a) and breakdown per public authority (b).

The profile of the farmers from our pool was compared to French national statistics (MTES, 2018; Agreste, 2022). In our survey, we observed an over-representation of farmers under 50 years old, with a university degree (Table A1). Additionally, organic farming was strongly over-represented in our survey since, in 2021, only 13.4% of French farms were organic farms according to MTES (2018), whereas in our study 41% of the farmers indicated being organic (Figure A4). Similarly, market gardening was also over-represented while livestock or mixed crop-livestock farming responses were under-represented in our survey (Figure A5). Furthermore, the advisors from our pool were mainly advisors in animal and crop production.

Table A1: Comparison between our survey responses and French national statistics (MTES, 2018) regarding farmers' age and education level.

		Representation of farmers		In France %
		In our study Number	%	
Age	50 years old and above	312	43%	55%
	Less than 50 years old	408	57%	45%
Education	University degree	454	63%	28%
	Certificate or associate degree	97	13%	34%
	High school diploma	166	24%	25%
	No diploma	3	0%	13%

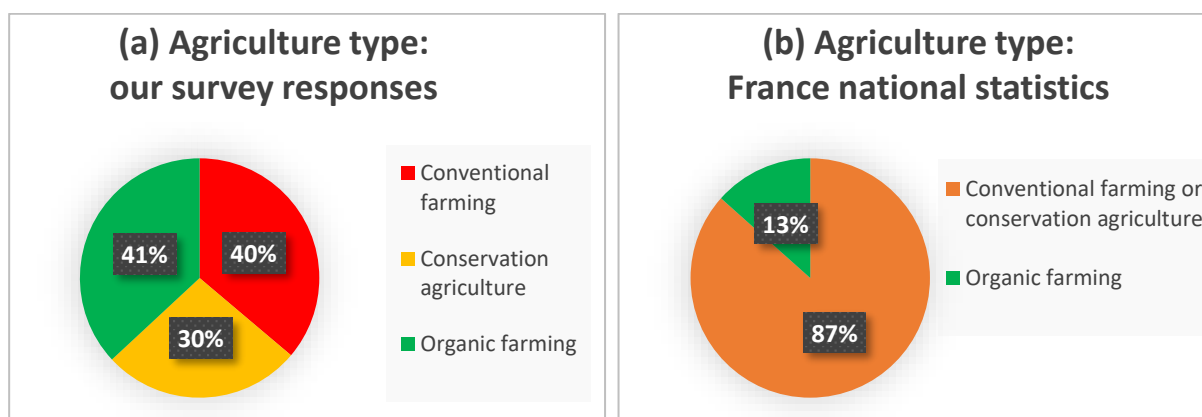


Figure A4: Comparison between our survey responses (a) and French national statistics (b) (Agreste, 2022) regarding the agriculture type. To be noted that French national statistics do not separate conservation agriculture from conventional farming.

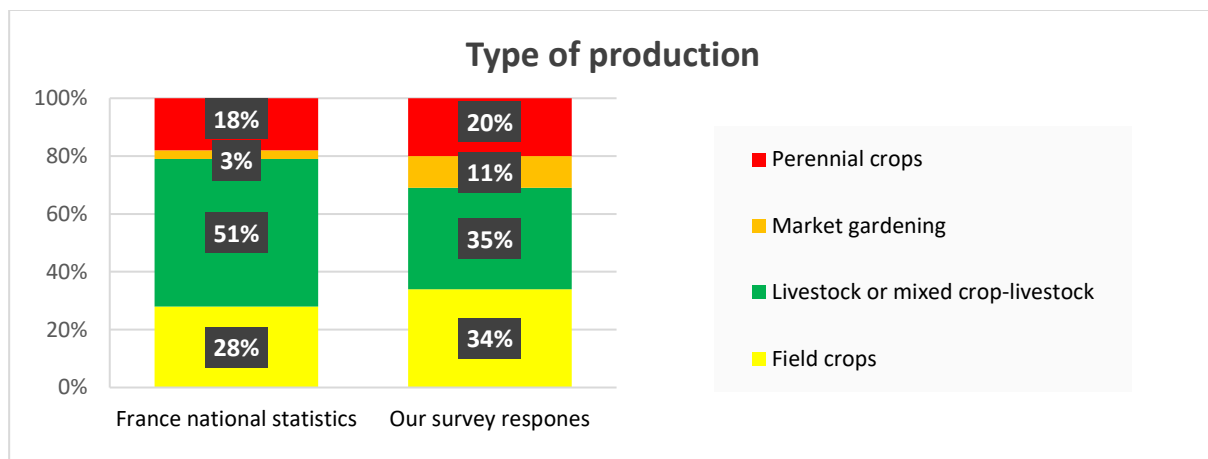


Figure A5: Comparison between our survey responses and French national statistics (Agreste, 2022) regarding farmers' production.

All French departments were represented in the consultation with a variation in the number of responses per department (Table A2). In one department 70 responses were obtained, whereas in another department only 3 responses were received. Responses were provided mainly by farmers in most of the departments, with the exception of five departments. One department obtained up to 30 responses from farmers.

Table A2: Distribution of the number of stakeholders responding to the consultation per department.

Value per department	All stakeholders	Farmers	Advisors	Researchers	NGO	Agricultural school	Public authorities
Minimum	3	0	0	0	0	0	0
First quartile	13	3	2	0	0	1	2
Median	18	6	4	0	1	2	3
Third quartile	26	11	6	1	1	3	6
Maximum	70	30	12	24	7	10	13
Mean	21	8	4	2	1	2	4

Our survey was conducted on a voluntary basis and was not systematic in nature, it is possible that respondents with a greater consideration of soil-related issues were more likely to participate. This could explain why we have an over-representation of young graduates and organic farmers in our survey. This has to be kept in mind while interpreting the results as it may induce a potential bias.

Stakeholders' level of soil knowledge, a self-assessment

In order to analyze the link between the stakeholders' level of soil knowledge and their access to soil knowledge, we performed an analysis of correspondence (CA) on these two points (Figure A6). The two first components of the CA explained nearly 90% of the total variance. The agglomerative hierarchical clustering (AHC) identified two different categories of stakeholders: (i) organic and conservation agriculture farmers, agricultural schools, researchers, advisors and NGOs generally considered that they had a good level of knowledge on soil and that their access to knowledge was medium or sufficient; (ii) conventional farmers and public authorities mainly considered that they had a basic level of knowledge and a medium to insufficient access to knowledge. This analysis showed that stakeholders who considered their

level of knowledge on soil as good, considered their access to knowledge as sufficient and vice versa. It is important to note that conventional farmers, who represent more than 80% of the farmers in France, generally considered their soil knowledge as basic and their access to soil knowledge as insufficient. They also had the lowest level of education but have generally higher empirical soil knowledge, showing here that the type of knowledge taken into account by farmers when replying to the questionnaire was theoretical and probably not empirical.

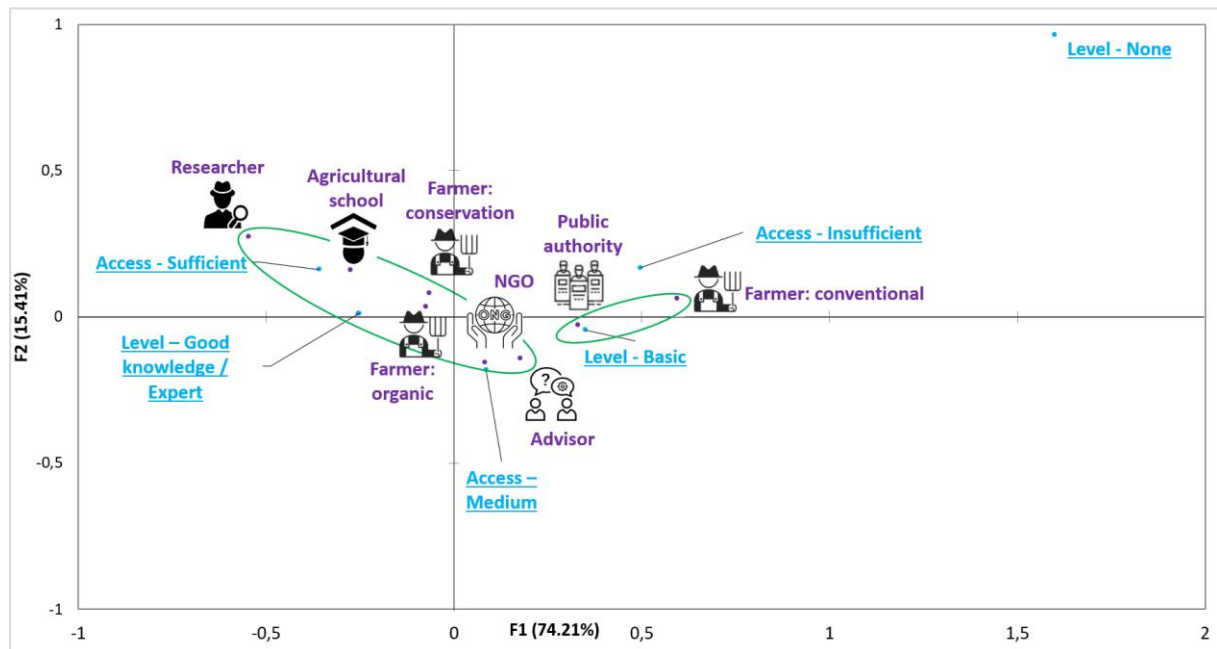


Figure A6: Two first components of the CA performed on the level of soil knowledge and the access to soil knowledge of the different categories of stakeholders. Stakeholders' responses to both questions are underlined in blue, whereas stakeholders are represented in purple. The closer points are from one another, the more the responses are alike. Green ellipses represent the results of an AHC made on the two first components of the CA.

In order to understand the situation of insufficient soil knowledge for certain categories of stakeholders, notably conventional farmers, further questions were addressed to the stakeholders. The objective was to evaluate whether they considered that soil knowledge they had access to was adapted to their needs, if knowledge sharing among stakeholders was satisfying and which sources stakeholders used to access soil knowledge. 60% of the stakeholders considered knowledge to be moderately (49%) or not at all (11%) adapted to their needs (Figure A7a). 90% of respondents rated knowledge sharing among stakeholders as average or insufficient (44% and 46% respectively) (Figure A7b). All stakeholders used all sources available to access soil knowledge but in different proportions (Figure A8). Farmers mostly used peer-to-peer groups (16%) to access knowledge while they did not use much social networks, web pages & blogs, and scientific literature. Agricultural advisory services were mainly used by farmers.

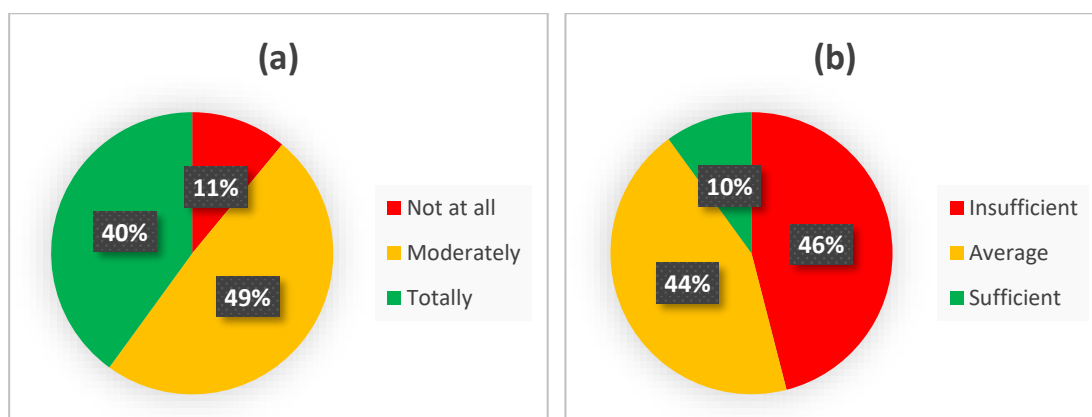


Figure A7: Knowledge adapted to stakeholders' needs (a) and quality of soil knowledge sharing (b) reported by stakeholders.

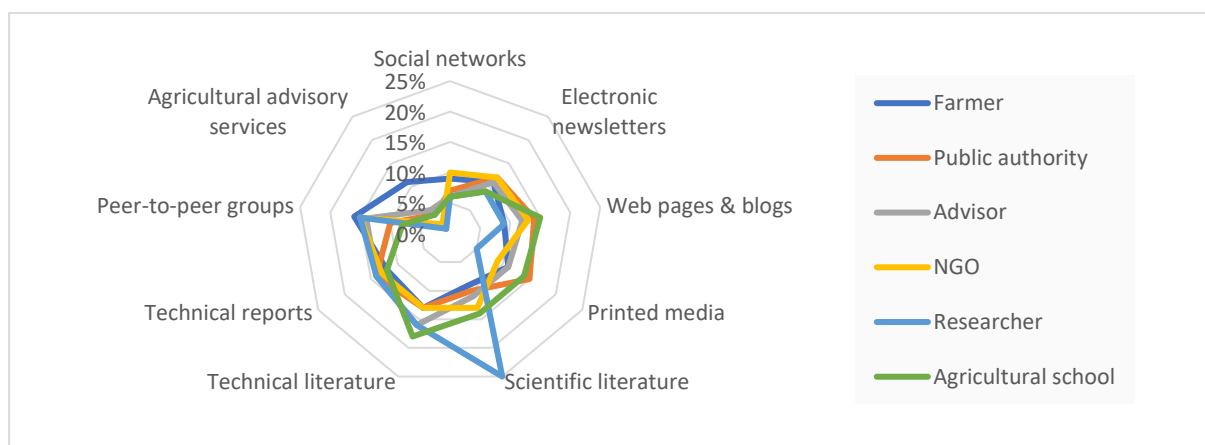


Figure A8: Sources used to access soil knowledge per stakeholder.

In order to analyze the link between knowledge adapted to stakeholders' needs and the sources used to access soil knowledge, we performed an analysis of correspondence (Figure A9). The two first components of the CA explained nearly 70% of the total variance. The agglomerative hierarchical clustering identified three different groups of stakeholders: a group formed by researchers, NGOs, agricultural schools and advisors, while farmers and public authorities formed the two other groups. The first group generally considered that soil knowledge they had access to, was more adapted to their needs. They used more scientific literature and technical reports than the two other groups. Farmers used more agricultural advisory services and public authorities printed media.

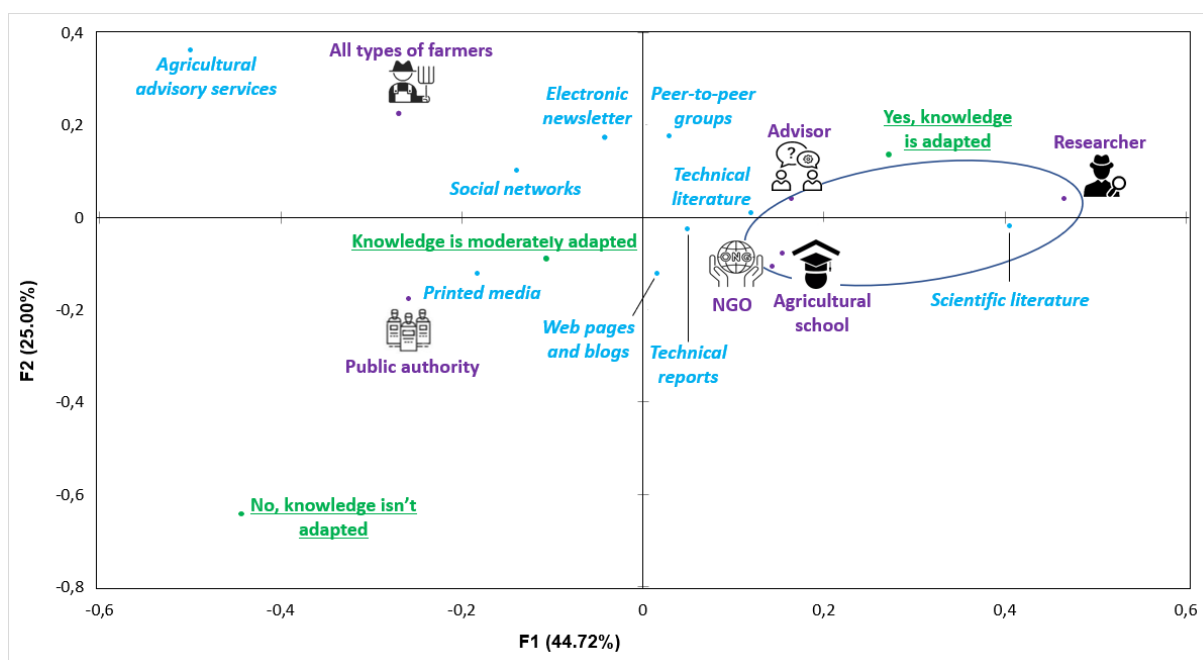


Figure A9: Two first components of the CA performed on the sources used to access soil knowledge and knowledge adapted to stakeholders' needs. Stakeholders' responses regarding soil knowledge adapted to their needs are underlined in green, whereas in italic blue the sources used are represented. Stakeholders are represented in purple. The ellipse represents the results of an AHC made on the two first components of the CA.

Most stakeholders considered the soil knowledge they had access to, to be moderately or not at all adapted to their needs and rated soil knowledge sharing among stakeholders as average or insufficient. Stakeholders (farmers and public authorities) who declared the most that soil knowledge was moderately to not adapted to their needs, mainly used agricultural advisory services and printed media respectively, and scarcely scientific literature.

Ways to improve stakeholders' access to soil knowledge

In order to improve the current situation, we tried to understand what the stakeholders considered as barriers to access soil knowledge, as well as the opportunities and the exchange networks that should be strengthened.

The barriers only slightly differed between the categories of stakeholders, therefore the results were presented aggregating all stakeholders (Figure A10). For one quarter of the stakeholders (25%), the lack of time was a barrier. The cost of training was not considered as a major barrier (6%). The four other barriers (68%) referred to the way soil knowledge transfer and sharing takes place.

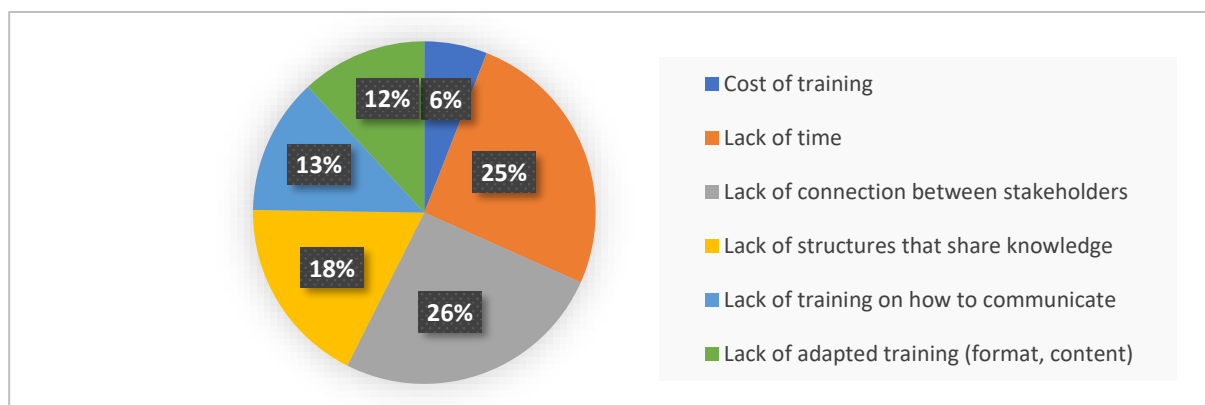


Figure A10: Main barriers to access soil knowledge.

In analogy to the perceived barriers, the opportunities to improve access to soil knowledge did not significantly differ between the categories of stakeholders (Figure A11). The three opportunities most often listed by the stakeholders concerned the way soil knowledge is shared and transferred (“support the development of demonstration activities”, “promote appropriate sharing”, and “promote knowledge at the territorial level”). They received 64% of the responses. Opportunities linked to research ranked high in the stakeholder’s choices with 28% for promoting research and enabling projects to share their results (17% and 11%, respectively). The identification of training content needs did not seem to be a major opportunity.

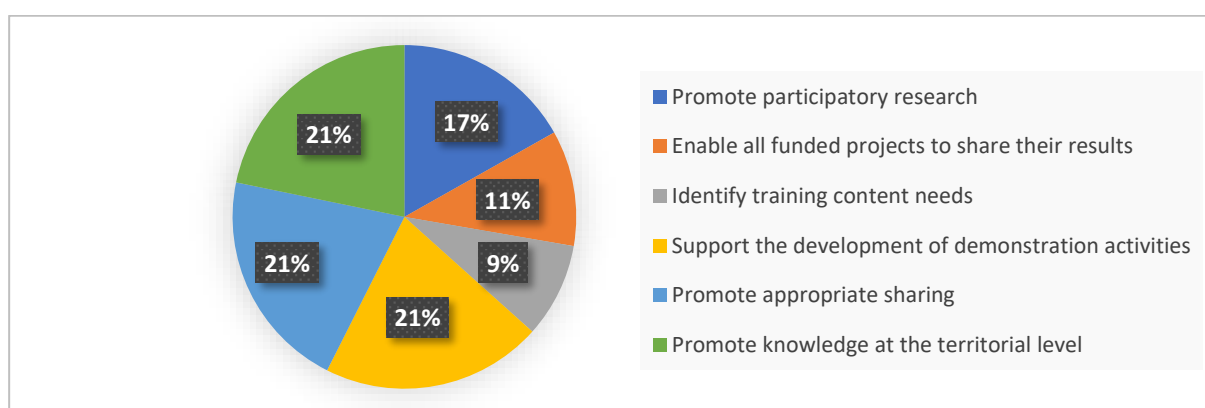


Figure A11: Reported main opportunities to improve access to soil knowledge.

Finally, a CA was performed to analyze the exchange networks to strengthen according to stakeholders’ point of view. The two first components of the CA explained 73% of the total variance (Figure A12). The agglomerative hierarchical clustering identified three different categories of stakeholders: (i) a first group composed by conventional farmers and advisors; (ii) a second group composed by researchers, NGOs and public authorities; and (iii) a last group composed by organic and conservation agriculture farmers and agricultural schools. The first group was more in favor of strengthening farmer-advisor networks; the second preferred policy-society, policy-science and science-society networks; and the last one farmer-science and farmer-policy networks. Peer-to-peer networks were also important to be strengthened according to all farmers. It should be noted that conventional farmers were more in favor of farmer-advisor networks, while organic and conservation agriculture farmers were more in favor of peer-to-peer networks as well as farmer-society, -policy or -science networks.

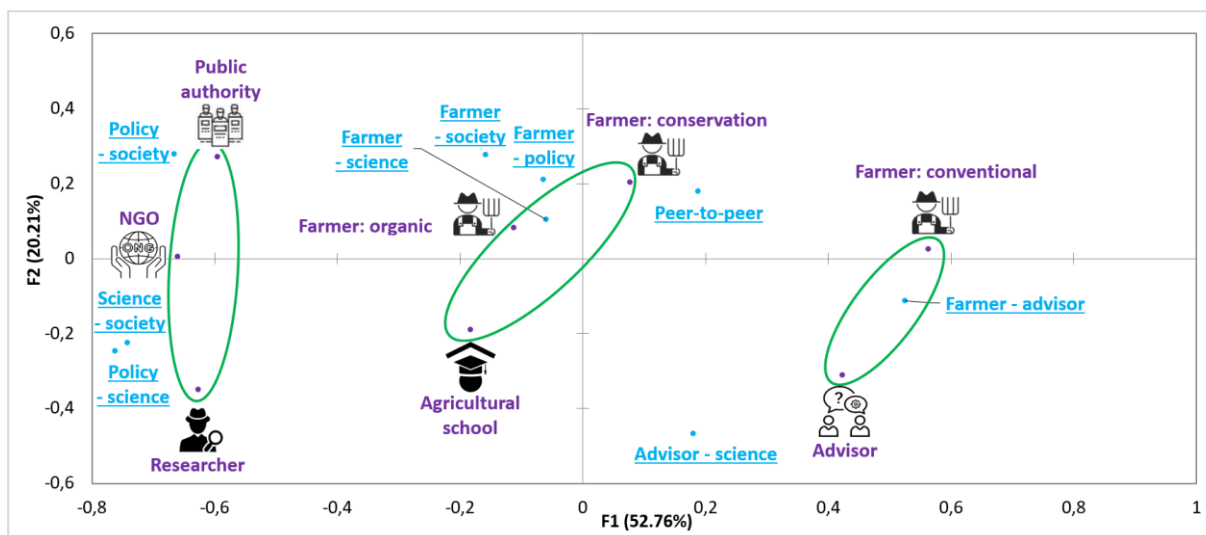


Figure A12: Two first components of the CA performed on the exchange networks to strengthen according to stakeholders' point of view. Exchange networks to strengthen are underlined in blue. Stakeholders are represented in purple. Green ellipses represent the results of an AHC made on the two first components of the CA.

DISCUSSION

Not adapted soil knowledge and insufficient soil knowledge sharing

In our study, most stakeholders considered the soil knowledge they had access to, as not adapted to their needs and rated soil knowledge sharing among stakeholders as average or insufficient (Figure A7). Researchers generally considered their level of soil knowledge and access to soil knowledge as sufficient but in the meantime, they rated soil knowledge sharing among stakeholders as average or insufficient. Since researchers play a significant role in the production of knowledge, when responding to this question, they may have considered the way soil knowledge is shared/transferred to other stakeholders, while other stakeholders' categories responded probably to the question considering the knowledge that was shared/transferred to their category.

It is important to note that conventional farmers, who directly manage soil, generally considered that they neither had a good knowledge on soil nor had sufficient access to soil knowledge. This raises the question of how knowledge is transferred to stakeholders and the different sources used to access soil knowledge. Stakeholders who reported the most that soil knowledge was moderately to not adapted to their needs, farmers and public authorities, mainly used agricultural advisory services and printed media as information sources, respectively (Figure A9). Feo et al. (2022) underlined that farmers preferred peer-to-peer groups, newsletters and visual materials. In our study, practitioners (farmers and advisors) and public authorities indicated scarcely using scientific literature, as Ugolini et al. (2015) also observed. On the other hand, scientific literature is the main source used by researchers (Figure A8).

Another outcome of this research on access to soil knowledge was the consensus on the main barriers and opportunities perceived by the stakeholders (Figures A10 and A11). The main

barriers to access soil knowledge were related to knowledge transfer and sharing, such as the lack of connection between stakeholders, and the lack of structures that shared knowledge. Similarly, in a survey in 20 countries from Vanino et al. (2023), the main barrier highlighted by stakeholders was the lack of established exchange networks.

Stakeholders value different exchange networks based on their type of knowledge

Exchange networks to strengthen in order to improve soil knowledge transfer and sharing is stakeholder dependent and based on the stakeholders' type of knowledge. The type of knowledge on soil of researchers, public authorities and NGOs is theoretical, whereas farmers have a more empirical knowledge on soil. Agricultural schools and advisors have both types of soil knowledge, theoretical and empirical.

In our study, stakeholders with theoretical knowledge (public authorities, NGOs, researchers) were more interested in reinforcing networks between policy, science and society (Figure A12). Researchers were very much focused on their relationship towards public authorities as well as raising society awareness. Other studies also highlighted the need for soil researchers to reinforce science-policy networks (Campbell et al., 2017; Amundson, 2020; Okpara et al., 2020; Vanino et al., 2023) and science-society networks (Bouma et al, 2012).

On the other side, stakeholders with empirical knowledge such as conventional farmers and advisors indicated being more in favor of peer-to-peer networks as well as farmer-advisor networks (Figure A12). They mentioned science-advisor networks as well, which interestingly has not been mentioned as strongly by the researchers. Conventional farmers and advisors valued positively the traditional model of knowledge transfer from researchers to advisors and finally to farmers, in a top-down linear format. The disadvantage of this traditional model is its lack of feedback from farmers to advisors and researchers (Kania & Żmija, 2016). Key et al (2016) highlighted the importance of a two-way knowledge exchange between farmers and researchers.

We identified another group of stakeholders. Agricultural schools and organic and conservation agriculture farmers featured the need for dialogue between farmers and society, policy and science stakeholders (Figure A12). Interesting was the clear difference observed among farmers between organic and conservation agriculture on the one hand and conventional farming on the other. We have here to remember that organic and conservation agriculture farmers who responded to our questionnaire were generally more educated than conventional farmers, explaining maybe their higher expectation from network with science, policy and society, while conventional farmers, less educated, preferred mediation through agricultural advisory services. The use of technical terminology and scientific jargon by researchers can make it difficult for a less educated audience to understand the messages, leading to the discrepancies in the responses between organic and conservation agriculture farmers and conventional farmers regarding networks involving science. As such, it is important for researchers to deliver clear and understandable messages for farmers and advisors (Sharon & Baram-Tsabari, 2014; Hou et al., 2020b). Indeed, advisors, despite being often highly educated, have generally basic knowledge in soil science as their educational background is mostly in animal and crop production.

Therefore, to strengthen knowledge transfer and sharing, three ways should be developed: (i) a traditional way of knowledge transfer in a top-down linear format by strengthening the profession of scientific mediator, distinct from the profession of researcher. It would be the responsibility of the scientific mediator to bridge the gap between academic research and the various stakeholders, as well as to provide a more comprehensive understanding of the research results; (ii) the establishment of Living Labs to bring stakeholders together around soil knowledge co-creation, since Living Labs are collaborative spaces where researchers, farmers, and other stakeholders can co-create together solutions with a tangible impact and share already existing sustainable practices (Veerman et al., 2020); and (iii) the strengthening of peer-to-peer interactions through the establishment of Lighthouse farms, that is to say farms that have achieved exceptional results in terms of soil health, and serve as models for other farmers to follow. As a matter of fact, the European Commission, aware of current communication gaps between practitioners, researchers and public authorities, promoted the establishment of “Living Labs” and “Lighthouses”.

The content of the theoretical knowledge transferred must be adapted to pedo-climatic conditions

Beside the ways of sharing and transferring soil knowledge (discussed above), it was also important, according to stakeholders, to promote soil knowledge at the territorial level (Figure A11). Pedo-climatic conditions, land use and farming systems varying considerably between countries and regions across Europe (Metzger et al., 2005; CIRCASA, 2017; Hessel et al., 2022), each region faces particular soil challenges. For instance, in the study of Vanino et al. (2023), “improving SOM & peat soil conservation” was the major concern for most zones, while in Southern Europe “improving water storage capacity” was recognized as the main soil challenge. This situation also applies to a territory as France that encompasses seven distinct environmental zones, out of the 13 environmental zones identified in Europe (Metzger et al., 2005). Therefore, increased attention to the context-specificity is needed, as standard agricultural solutions are inadequate. The content of the theoretical knowledge transferred should be adapted to specific pedo-climatic conditions. Living Labs that develop location specific solutions and knowledge for sustainable soil and land management that include socio-economic drivers, incentive mechanisms, and local pedo-climatic conditions (Löbmann et al., 2022), could once again represent an ideal tool to that respect.

Limit of our approach

The work we conducted was underpinned by effective consultation with a variety of stakeholders. However, some limitations should be noted. Online surveys are conducted on a voluntary basis and are not systematic in nature. Therefore, it is possible that the respondents with a greater knowledge of soil-related issues were more likely to participate, as shown by the over-representation of young graduates and organic farmers in our survey. Furthermore, conducting an online survey might have caused our sample to be biased towards more digitally advanced stakeholders, potentially missing out on insights from older farmers. Finally, the use of a questionnaire with predetermined answers, which has the advantage of being quick to complete, has the disadvantage of limiting the diversity of possible responses. As such, it is possible that important points of view were not included in the research.

CONCLUSION

Stakeholders largely answered our survey, with 1,951 answers, including 720 from farmers. By responding to the survey, farmers showed that they were committed to improving their access to the latest information and research on soil. Our results suggested that stakeholders consider the soil knowledge they have access to as not adapted to their needs. They also revealed that soil knowledge sharing between stakeholders was not sufficient. Stakeholders valued different exchange networks based on their type of knowledge. Stakeholders with more theoretical soil knowledge (public authorities, NGOs, researchers) stated being more interested in networks between policy, science and society. However, networks with farmers and advisors were more favored by stakeholders with empirical soil knowledge. There is a need to strengthen exchanges at a local level, as well as networks between peers and in relation to science. Research is not always sufficiently anchored at a local level and with practitioners, such as farmers and advisors.

Therefore, to bridge the gap of knowledge transfer and sharing, three ways should be developed. Firstly, the profession of scientific mediator should be further strengthened. It would be the responsibility of the scientific mediator to bridge the gap between researchers and the various stakeholders, as well as to provide a more comprehensive understanding of the research results. Stakeholders could be better informed and then make more informed decisions. Secondly, Living Labs should be established. Living Labs can be used to create a platform for co-creation between various stakeholders mixing both theoretical and empirical soil knowledge for a research more anchored at a local level allowing to bring together stakeholders. Finally, Lighthouse farms, places for demonstration of solutions and exemplary achievements, should be established. Through the use of demonstration activities, soil knowledge can be made more accessible and concrete, allowing it to be more readily understood by a wider range of people and to initiate valuable exchanges between theoretical and empirical soil knowledge. Only a combination of these three ways of knowledge sharing and transfer will ensure a transition towards a more sustainable soil management in Europe.