

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

E. Mason, D. Chavrit^(*), F. Héliès, C. Jolivet, D. Arrouays et A. Bispo

INRAE, Info&Sols, 45075, Orléans, France.

* Auteur correspondant : deborah.chavrit@inrae.fr

RÉSUMÉ

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 36 000 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 actuellement 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.

Comment citer cet article :

Mason E., Chavrit D., Héliès F., Jolivet C., Arrouays D. et 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

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

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

Mots-clés

Réseau de mesures de la qualité des sols, RMQS, CorText, analyse de littérature, écologie microbienne, éléments traces métalliques, carbone organique, qualité des sols, stratégie d'échantillonnage.

SUMMARY**ASSESSMENT OF THE FIRST 20 YEARS OF SCIENTIFIC PRODUCTIONS OF THE FRENCH SOIL QUALITY MONITORING NETWORK (RMQS)**

The French Soil Quality Monitoring Network (RMQS) is a French soil sampling and analysis programme, ongoing since 2000 and based on 2240 sites. To monitor the fate of soil quality, a new sampling campaign is planned every fifteen years. So far, 36,000 samples have been collected and stored. The assessment and monitoring of soil quality are based on the description of soil and its environment, the analysis of physical, chemical and biological properties of soil, and the knowledge of the history of land use and management practices at each site. The aim of our study is to identify how the RMQS data are used and who is using them in scientific studies. We searched for scientific publications on the RMQS or using RMQS data and/or samples in bibliographic databases. We focused on articles from peer-reviewed scientific journals and books published in English and French. A textual analysis using the CorText digital platform was carried out to obtain a comprehensive overview of the content of the 236 publications identified, as of 26 July 2022. The textual analysis revealed that soil quality monitoring, trace element content, abundance and diversity of microbial communities, carbon content and the sampling strategy are, in decreasing order of importance, the main topics addressed in the publications. As for the actors, 72% of the main authors who as of now have published more than 6 articles are from INRAE (French national research institute for agriculture, food and environment). Two journals, "Étude et Gestion des Sols" and "Geoderma", published almost one third of the articles identified. Opening the access to the network's data should further increase the number and topics of publications, as well as the publishing teams.

Key-words

French Soil Quality Monitoring Network, RMQS, CorText, literature review, microbial ecology, trace elements, organic carbon, soil quality monitoring, sampling strategy.

RESUMEN**BALANCE DE LOS PRIMEROS 20 AÑOS DE PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DE LA RED DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO (RMQS)**

La Red de Medición de la Calidad de los Suelos (RMQS) es un programa de muestreo y análisis de suelos francés establecido desde 2000, compuesto por 2.240 sitios. Está prevista una nueva campaña de muestreo cada 15 años para seguir la evolución de la calidad del suelo. La primera campaña y la mitad de la segunda, actualmente en curso, permitieron recoger y almacenar 36.000 muestras. La evaluación y el seguimiento de la calidad del suelo se basan en el análisis de las propiedades fisicoquímicas y biológicas de dichas muestras en relación con la descripción del suelo, su entorno y el conocimiento de la historia de la ocupación y de las prácticas de gestión de cada sitio. Estas etapas de observación, análisis y recogida de información sobre los suelos son condiciones previas para numerosos trabajos de investigación destinados a calificar el estado de los suelos e informar sobre su evolución. Nuestro estudio tiene como objetivo determinar quién utiliza los datos y muestras del RMQS y para qué usos, principalmente de investigación. Para ello, utilizando bases de datos bibliográficas, hemos inventariado publicaciones científicas sobre el RMQS o utilizando datos y/o muestras del RMQS. Hemos examinado artículos de revistas científicas de comité de lectura y libros publicados en francés e inglés. Se realizó un análisis textual utilizando la plataforma digital Cortext para obtener una comprensión global del contenido de las 236 publicaciones identificadas el a la fecha del 26 de julio de 2022. El análisis textual reveló que el seguimiento de la calidad del suelo, el contenido de en elementos trazas, la abundancia y la diversidad de las comunidades microbianas, el contenido de en carbono y la estrategia de muestreo están en orden decreciente de importancia los principales temas tratados en las publicaciones. En cuanto a los actores, el 72% de los principales autores que han publicadoron más de 6 artículos son de INRAE (Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, la Alimentación y el Medio Ambiente). Dos revistas, «Estudio y Gestión de los Suelos» y «Geoderma», publicaron cerca de un tercio de los artículos identificados. La apertura de los datos de la red debería permitir aumentar aún más el número y los temas de las publicaciones, al igual que como de los equipos que publican.

Palabras clave

Red de medición de la calidad del suelo, RMQS, Cortext, análisis de literatura, ecología microbiana, elementos trazas metálicos, carbono orgánico, calidad del suelo, estrategia de muestreo.

1. 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 (European Commission *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, capacité d'échange cationique, 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, parcs et 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 (Institut National de la Recherche Agronomique *et al.*, 2021). 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 et primordiale. 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 tendances et évolutions depuis 20 ans.

2. MÉTHODOLOGIE

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.

2.1 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 (<https://hal.inrae.fr/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'écartier 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 1). 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 1). Une analyse textuelle a été faite du corpus composé des publications en français et une autre du corpus avec les publications en anglais.

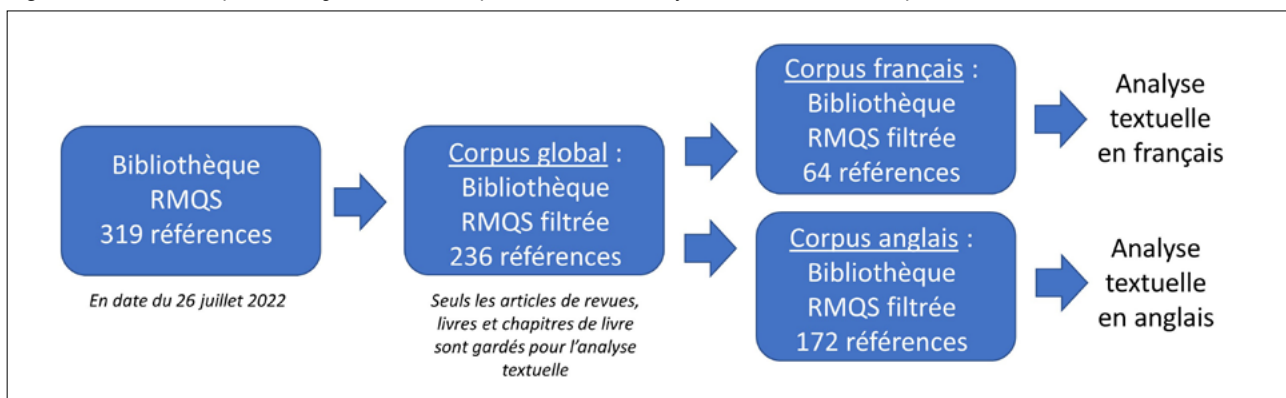
2.2 Analyse textuelle du corpus par l'outil CorText

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 (Section 2.1).

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 (Section 2.1).

Figure 1 : Schéma indiquant les étapes nécessaires à la détermination des 3 corpus utilisés dans cette étude à partir de la bibliothèque RMQS

Figure 1: Workflow steps enabling to set the 3 corpus used in this study, from the initial RMQS publication list



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).

3. RÉSULTATS : ANALYSE DU CORPUS COMPLET

3.1 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 1*). Parmi celles-ci, 199 sont des articles de revues scientifiques publiés, 15 sont des livres et 22

sont des sections de livre. Les références des 236 publications figurent dans l'annexe.

Les publications identifiées datent toutes de 2001 à 2022 inclus (*Figure 2*). 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.

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.

3.3 Orientation thématique des corpus

3.2.1 Orientation thématique du corpus en français

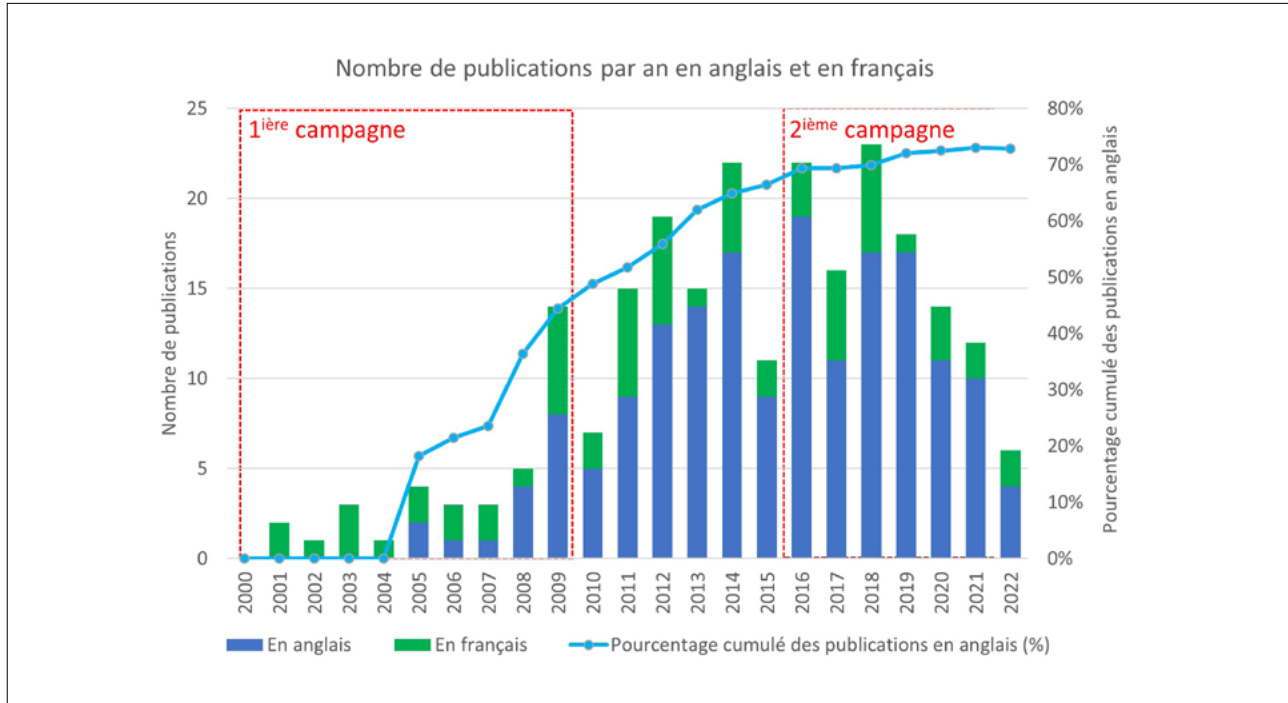
Analyse des principaux termes extraits par CorText

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 1*). *In fine*, 31 % des publications du corpus en français contiennent le terme « mesure de la qualité ».

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 3*. 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 3*). 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 descrip-

¹ Pour en savoir plus : voir le site de Cortext Manager (<https://www.cortext.net/projects/cortext-manager/>) et la documentation sur cet outil (<https://docs.cortext.net/>).

Figure 2 : Graphique représentant le nombre de publications par an par langue**Figure 2:** Number of publications in French (green) and in English (blue)**Tableau 1 :** Nombre de publications qui contiennent les principaux termes utilisés dans le corpus en français**Table 1:** Number of publications containing the main words used in the French corpus

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 %

tion 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 si-

gnificative 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.

3.2.2 Orientation thématique du corpus en anglais

Analyse des principaux termes extraits par CorText

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 2). 12 % des publications du corpus en anglais contiennent le terme “soil mapping”.

La carte de réseau a permis d’identifier 6 clusters thématiques (Figure 4). 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

Figure 3 : Carte de réseau du corpus des 64 articles publiés en français
Figure 3: Network map of the corpus of the 64 articles published in French

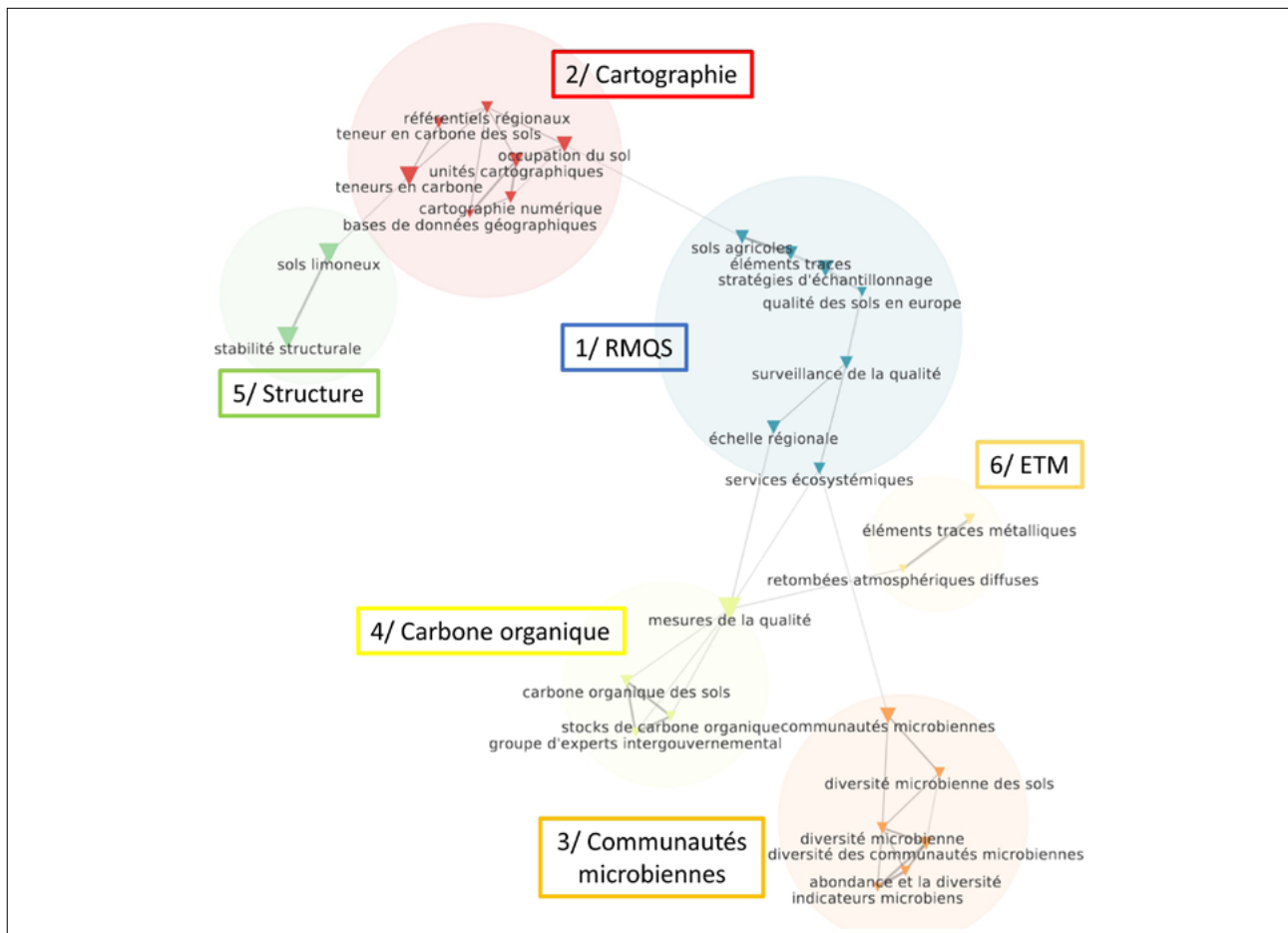


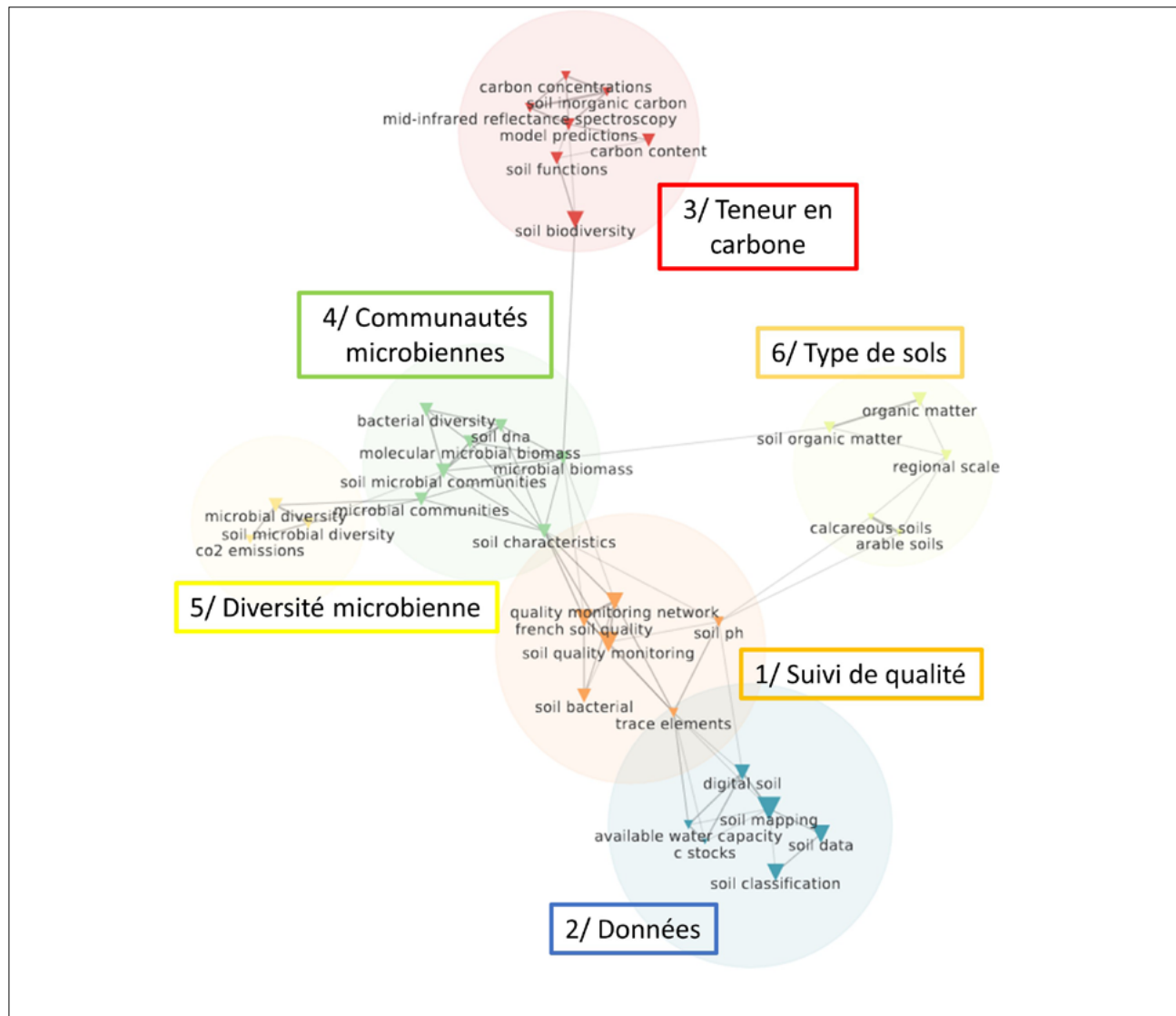
Tableau 2 : Nombre de publications qui contiennent les principaux termes utilisés dans le corpus en anglais

Table 2: Number of publications containing the main words used in the English corpus

Corpus en anglais : 172 publications		
Principaux termes utilisés	Publications qui contiennent ces termes (en nombre)	Publications qui contiennent ces termes (en %)
soil mapping	20	12 %
soil quality monitoring	19	11 %
organic matter	14	8 %
trace elements	12	7 %
soil bacteria	11	6 %

Figure 4 : Carte de réseau du corpus des 172 articles publiés en anglais

Figure 4: Network map of the corpus of the 172 articles published in english



contenu ». 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".

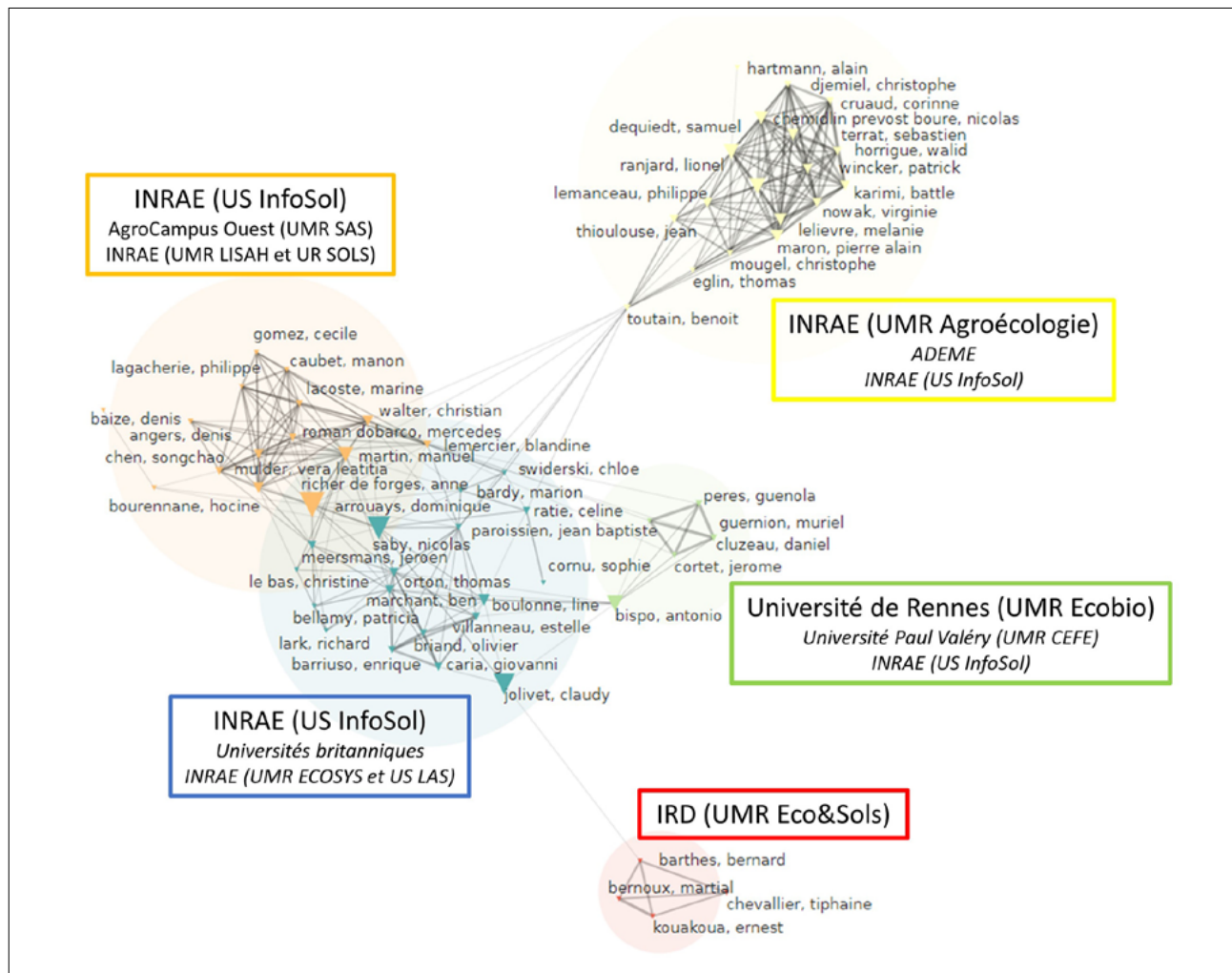
3.3 Principaux auteurs des publications

Analyse des principaux auteurs

Parmi les plus de 800 auteurs des 236 publications en anglais et français constituant notre corpus global (Figure 1), 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

Figure 5 : 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

Figure 5: Map of the inter-connections between the 60 most frequent authors. In bold, for each cluster the institute and/or unit of the majority of the cluster authors; in italic other institutes/units having only one or two authors in the cluster



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 5* représente les inter-connectivités 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.

Analyse des revues, supports de publications et citations

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 3*, 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 3*). 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 de citations cumulé de ces 199 articles est de 11 579. 61 articles, soit 31 % des articles, ont été cités plus de 50 fois chacun (*Tableau 4*). Un article faisant référence au RMQS a été cité plus de 1 400 fois (Minasny *et al.*, 2017).

Tableau 3 : Principales revues dans lesquelles publient les auteurs et Facteurs d'Impact associés

Table 3: Main journals in which the authors have published and associated impact factors

Nom revue	Editeur de la revue	Langue de la revue	Facteur d'impact (2021-2022)	Nombre publications du 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 4 : Classement des articles selon le nombre de fois qu'ils ont été cités

Table 4: Classification of articles by number of times they were cited

	Nombre d'articles
Articles cités entre 0 à 9 fois	49
Articles cités entre 10 à 49 fois	89
Articles cités entre 50 à 99 fois	30
Articles cités entre 100 à 199 fois	22
Articles cités entre 200 à 499 fois	8
Articles cités plus de 500 fois	1

4. DISCUSSION

4.1 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).

4.2 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 6). 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 « communautés microbiennes » 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

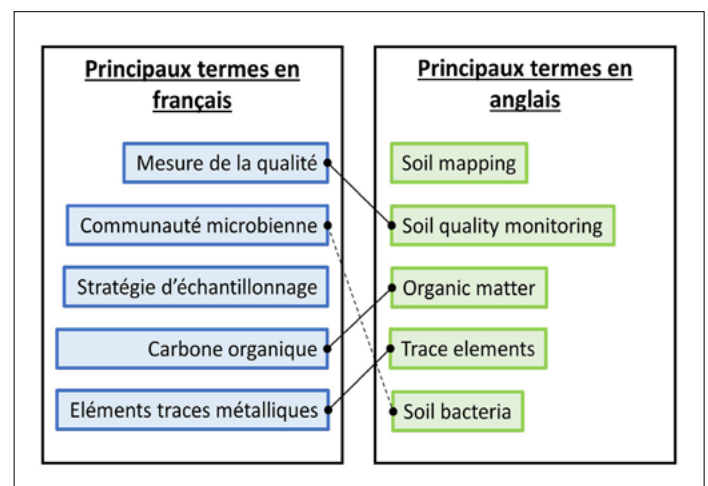
(bactéries, champignons, voire archées). Le terme « stratégie d'échantillonnage » apparaît plus fréquemment dans le corpus français qu'anglais. On peut émettre l'hypothèse que la stratégie d'échantillonnage est davantage développée dans le corpus français les premières années du réseau pour le présenter 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).

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 3 et 4). 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.

Figure 6 : Schéma représentant les principaux termes utilisés dans les corpus anglais et français

Figure 6: Main words used in the French and English corpus



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 (Institut National de la Recherche Agronomique et al., 2021), 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).

4.3 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; Karimi et al., 2018, 2019, 2020);
- 2) aux avancées sur la caractérisation des propriétés des sols et de leurs déterminants majeurs à l'échelle nationale, 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, 2020);
- 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).

4.4 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 (Stanton 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 covariables, 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.

4.5 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.

5. 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 particulières, 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, microorganismes 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, démontrent 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.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs remerciements à l'équipe chargée de la coordination du RMQS et à l'équipe du Conservatoire Européen des Échantillons de Sols pour leur travail dévoué et rigoureux pendant toutes ces années sur le réseau. Nous remercions également les partenaires du Gis Sol pour leur confiance et leur soutien financier, ainsi que tous les partenaires régionaux ayant contribué à la mise en place du RMQS et à la réalisation des campagnes d'échantillonnage, et les nombreuses équipes ayant collaboré à faire progresser nos connaissances en utilisant les données et/ou les échantillons du réseau. Nous remercions également les relecteurs de cet article, pour leur analyse minutieuse, objective et très constructive, qui a permis d'améliorer significativement cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- 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. *Étude et Gestion des Sols*, 49-56.
- 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>
- Bispo A., Arrouays D., Saby N.P.A., Boulonne L., Fantappiè M. (2021). Proposal of methodological development for the LUCAS programme in accordance with national monitoring programmes. *EJP SOIL - Deliverable 6.3*. https://ejpsol.eu/fileadmin/projects/ejpsol/WP6/EJP_SOIL_Deliverable_6.3_Dec_2021_final.pdf
- Bispo A., Fantappiè M., van Egmond F., Smreczak B., Bakacsi Z., Hessel R., Wetterlind J., Siebec 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
- 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>
- 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
- 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>
- 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>
- Delmas M., Saby N., Arrouays D., Dupas R., Lemerrier B., Pellerin S., Gasquet-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>
- 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, in: Réchauchère O., Bispo A., Gabrielle B., Makowski D. (Eds.), *Sustainable Agriculture Reviews 30: Environmental Impact of Land Use Change in Agricultural Systems*, Sustainable Agriculture Reviews. Springer International Publishing, Cham, pp. 15-38. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96289-4_2
- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Veerman C., Bastioli C., Biro B., Bouma J., Cienciala E., Emmett B., Frison E., Grand A., Hristov L., Kriaučiūnienė Z., Pogrzeba M., Soussana J., Vela C., Wittkowski R. (2020). Caring for soil is caring for life: ensure 75%

- of soils are healthy by 2030 for healthy food, people, nature and climate: interim report of the mission board for soil health and food. Publications Office.
- 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>
- 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>
- 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>
- Institut National de la Recherche Agronomique, Association Marnaise de Développement Agricole et Viticole, Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA), Chambre Départementale d'Agriculture des Ardennes, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Aube, Chambre Départementale d'Agriculture du Calvados, Chambre Départementale d'Agriculture de Charente, Chambre Départementale d'Agriculture de Charente-Maritime, Chambre Départementale d'Agriculture du Cher, Chambre Départementale d'Agriculture de Corrèze, Chambre Départementale d'Agriculture de la Côte D'Or, Chambre Départementale d'Agriculture de Creuse, Chambre Départementale d'Agriculture des Deux-Sèvres, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Eure, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Eure-et-Loir, Chambre Départementale d'Agriculture de Haute-Marne, Chambre Départementale d'Agriculture de Haute-Vienne, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Indre, Chambre Départementale d'Agriculture de Loire-Atlantique, Chambre Départementale d'Agriculture de Mayenne, Chambre Départementale d'Agriculture de la Manche, Chambre Départementale d'Agriculture de Mayenne, Chambre Départementale d'Agriculture de la Nièvre, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Orne, Chambre Départementale d'Agriculture de Saône-et-Loire, Chambre Départementale d'Agriculture de Seine-et-Marne, Chambre Départementale d'Agriculture de Seine-Maritime, Chambre Départementale d'Agriculture de Vendée, Chambre Départementale d'Agriculture de la Vienne, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Yonne, Chambre Départementale d'Agriculture de la Vienne, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Yonne, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine, Chambre Régionale d'Agriculture de Picardie, Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes, Conseil Général de Mayenne, École Nationale d'ingénieurs des Travaux Agricoles de Bordeaux (ENITAB), EDIACARA, Établissement National d'enseignement Supérieur Agronomique de Dijon (ENESAD), Genevois-Gomendy-Sol et Environnement, Groupe Régional Agronomie Pédologie Environnement (GRAPE Franche-Comté), Institut Forestier National (IFN), Institut National d'Horticulture D'Angers (INH), Institut National Polytechnique-Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse (INP-ENSAT), Institut Supérieur d'Agriculture de Lille (ISA), SCITERRE, Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale (SCP), Rhône-Alpes (SIRA), S.I.R.A.-C.R.D.D. (2021). Analyses physico-chimiques des sites du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) du territoire métropolitain pour la 1^{re} campagne (2000-2009), avec coordonnées théoriques. <https://doi.org/10.15454/QSXXKA>
- 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>
- 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.
- 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>
- 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., 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. (2020). Biogeography of soil microbial habitats across France. *Global Ecology and Biogeography*, 29(8), 1399–1411. <https://doi.org/10.1111/geb.13118>
- Lacarcé 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>
- Louis B.P., Saby N.P.A., Orton T.G., Lacarcé 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>
- 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>
- 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., Io 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., Lacarcé E., Meersmans J., Saby N.P.A., Paroissien J.B., Jolivet C., Boulonne L., Arrouays D. (2014). Evaluation of model-

- ling 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>
- 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.
- 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., Padian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovov V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsu, C.-C., Vågén 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>
- 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>
- 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>
- Paroissien J.-B., Orton T.G., Saby N.P.A., Martin M.P., Jolivet C.C., Ratié 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>
- 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>
- 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. *Étude 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: Environmental Impact of Land Use Change in Agricultural Systems. Springer.
- 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
- Saby N., 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., Lemerrier 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>
- Sandoval M., Tarot C. (2014). Étude 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 GioFoodS. INRA, Paris, p. 73.
- 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>
- 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.
- 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. *Étude et Gestion des Sols*, 24, 83-98
- 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.
- Ubando A., Del Rosario A., Chen W., Culaba A. (2021). A state-of-the-art review of biowaste biorefinery. *Environmental Pollution* 269, 116149. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116149>
- 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>

ANNEXE

Inventaire des publications scientifiques sur le RMQS ou utilisant des données et/ou des échantillons du RMQS - https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/05/EGS_2023_Mason_Annexe.csv