HAL
open science

Quelles perspectives scientifiques et techniques pour l'inventaire et la surveillance des sols en France : Quels besoins en données, comment mieux les acquérir, les diffuser, les utiliser ?

Chantal Gascuel-Odoux, Pierre Renault, Véronique Antoni, D. Arrouays, Nolwenn Bougon, Sébastien Denys, Julien Fiquepron, Yves François, Antoine Ilef, Irénée Joassard, et al.

To cite this version:

Chantal Gascuel-Odoux, Pierre Renault, Véronique Antoni, D. Arrouays, Nolwenn Bougon, et al.. Quelles perspectives scientifiques et techniques pour l'inventaire et la surveillance des sols en France : Quels besoins en données, comment mieux les acquérir, les diffuser, les utiliser ?. Étude et Gestion des Sols, 2023, 30, pp.51-64. hal-04085007

HAL Id: hal-04085007

https://hal.inrae.fr/hal-04085007v1

Submitted on 28 Apr 2023

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

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

Numéro spécial
20 ans du GIS Sol

Quelles perspectives scientifiques et techniques pour l'inventaire et la surveillance des sols en France :

Quels besoins en données, comment mieux les acquérir, les diffuser, les utiliser ?

C. Gascuel-Odoux(1,2*), P. Renault(2,3), V. Antoni(4), D. Arrouays(5), N. Bougon(6), S. Denys(7), J. Fiquepron(8), Y. François(9), A. Ilef(10), I. Joassard(4), M. Kaszynski(11), P. Laville(12), C. Le Bas(5), E. Vaudour(13) et A. Bispo(5)

1) INRAE, Institut Agro, UMR SAS, 35042 Rennes Cedex, France
2) INRAE, Direction Scientifique Environnement, 75338 Paris Cedex 7, France
3) INRAE, Univ. Avignon, UMR EMMAH, 84914 Avignon Cedex 9, France
4) Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, Service des données et études statistiques, France
5) INRAE, Infosol, 45075, Orléans, France
6) OFB, DRAS, 94300 Vincennes, France
7) Santé Publique France, DSET, 94415 Saint-Maurice Cedex, France
8) CNPF, 54000 Nancy, France
9) Agriculteur, 55700 Luzy Saint Martin, France
10) Mairie du Havre, 76084 Le Havre, France
11) Laboratoire d'Initiative Foncières et Territoriales Innovantes 75008 Paris, France
12) Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 75007 Paris, France
13) Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR EcoSys, 91120 Palaiseau, France

* Auteur correspondant : chantal.gascuel@inrae.fr

RÉSUMÉ

Le groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS Sol) a pour mission de concevoir et coordonner des actions d'inventaire des sols et de suivi de leurs qualités, de développer et gérer un système d'information sur les sols et les services écosystémiques auxquels ils contribuent. Le 6 décembre 2021, le GIS Sol fêtait ses 20 ans, l'occasion de dresser un bilan et d'esquisser des perspectives scientifiques et techniques, alors que les questions liées aux sols prennent une place croissante dans l'agenda des politiques internationales, européennes et nationales, cela se traduisant par une demande en forte hausse de données et

Comment citer cet article :
Gascuel-Odoux C., Renault P., Antoni V., Arrouays D., Bougon N., Denys S., Fiquepron J., François Y., Ilef A., Joassard I., Kaszynski M., Laville P., Le Bas C., Vaudour E. et Bispo A., 2023 - Quelles perspectives scientifiques et techniques pour l'inventaire et la surveillance des sols en France : quels besoins en données, comment mieux les acquérir, les diffuser, les utiliser ? Étude et Gestion des Sols, 30, 51-64

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/

d'indicateurs. Cet article comporte trois parties : la première analyse les besoins exprimés à l'occasion d'une enquête en ligne largement diffusée entre septembre 2021 et février 2022 et qui a collecté 203 réponses ; la seconde rapporte les besoins exprimés lors d'une table ronde d'acteurs de la gestion des sols qui a eu lieu lors de la journée des 20 ans du GIS Sol ; une troisième esquisse des perspectives scientifiques et techniques pour l'inventaire et la surveillance des sols, celles-ci découlant autant de cette journée que de l'état de l'art scientifique. Ces perspectives n'engagent pas le GIS Sol ; elles ont vocation à l'aider dans ses réflexions, ses décisions relevant de ses instances de gouvernance. Plusieurs options, éventuellement en combinaison, s'ouvrent au GIS Sol pour les prochaines années : rester dans son cœur de métier alors que ses moyens sont fragiles ; investir de nouveaux enjeux, en particulier de santé humaine, et mobiliser de nouvelles technologies, comme la télédétection ; adopter une posture d'observatoire et rassembler les données collectées dans différents cadres (déclinaisons territoriales des politiques publiques) et par différentes approches (sciences et recherche participatives).

Mots-clés
Sol, surveillance, inventaire, cartographie, acquisition, diffusion, appropriation, perspectives, besoins, données, information.

SUMMARY
PERSPECTIVE FOR SOIL INVENTORY AND MONITORING IN FRANCE:
Which data are needed? How better to acquire them, to diffuse and use them?

The objective of the « Groupement d'intérêt scientifique Sol » (GIS Sol) is to design and coordinate soil inventory and monitoring actions, to develop and manage an information system on soils and their contribution to ecosystem services. On December 6th of 2021, it celebrated its 20th anniversary, an opportunity to take stock and outline prospects, while soils are arising on the agendas of international, European and national policies, and more data and indicators are required for soil inventory, monitoring and management. This article is composed of three parts: the first one develops an analysis of the social needs expressed during an online survey widely distributed between September and February 2022 and which collected 203 responses; the second one presents the needs expressed during a round table of actors of soil management which took place during GIS Sol's 20th anniversary day; the third one outlines scientific and technical prospects discussed that day and coming from the scientific literature. These perspectives do not commit GIS Sol as its decisions are the responsibility of its governance bodies. The GIS Sol appears at a crossroad, combining more or less different ways: to remain in its core business because of weak resources; to open up to new challenges, particularly on human health or soil biodiversity, on new technologies such as remote sensing; to act as a national observatory which collects and unifies data coming from different frameworks such as territorial declination of public policies or from different approaches such as citizen science.

Key-words
Soil, Inventory, monitoring, mapping, acquisition, diffusion, appropriation, perspective, needs, data, information.

RESUMEN
¿QUÉ PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS Y TÉCNICAS PARA EL INVENTARIO Y LA VIGILANCIA DE LOS SUELOS EN FRANCIA:
Qué necesidades de datos, cómo adquirirlos mejor, difundirlos, utilizarlos?

El Grupo de Interés Científico Suelo (GIS Sol) tiene por misión diseñar y coordinar acciones de inventario de los suelos y de seguimiento de sus cualidades, desarrollar y gestionar un sistema de información sobre los suelos y los servicios ecosistémicos a los que contribuyen. El 6 de diciembre de 2021, el GIS Sol celebró su 20º aniversario, ocasión para hacer balance y esbozar perspectivas científicas y técnicas, mientras que las cuestiones relacionadas con los suelos ocupan un lugar creciente en la agenda de las políticas internacionales, europeas y nacionales, esto se traduce en una gran demanda de datos e indicadores. Este artículo tiene tres partes: la primera analiza las necesidades expresadas en una encuesta en línea ampliamente difundida entre septiembre de 2021 y febrero de 2022 y que recogió 203 respuestas; la segunda menciona las necesidades expresadas en una mesa redonda de actores de la gestión de los suelos que tuvo lugar el día de los 20 años del GIS Sol; una tercera esboza perspectivas científicas y técnicas para el inventario y la vigilancia de los suelos, estas derivan tanto de este día como del estado del arte científico. Estas perspectivas no comprometen al GIS Sol; tienen vocación de ayudarle en sus reflexiones, sus decisiones dependen de sus instancias de gobernanza. Varias opciones, posiblemente en combinación, se abren al GIS Sol para los próximos años: permanecer en su núcleo de actividad mientras sus medios son frágiles; invertir nuevos retos, en particular de salud humana, y movilizar nuevas tecnologías, como la teledetección; adoptar una postura de observatorio y reunir los datos recogidos en diferentes contextos (variaciones territoriales de las políticas públicas) y mediante diferentes enfoques (ciencia e investigación participativas).

PALABRAS CLAVE
Suelo, vigilancia, inventario, cartografía, adquisición, difusión, apropiación, perspectivas, necesidades, datos, información.

Acronymes et abréviations

AFES : Association française pour l'étude du sol
ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
BDAT : Base de données d'analyses des terres
BDETM : Base de données des éléments traces métalliques
BDSolU : Base de données des analyses de sols urbains
GIS : Groupement d'intérêt scientifique
IGCS : Inventaire, gestion et conservation des sols
IGN : Institut national de l'information géographique et forestière
Ineris : Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

1. INTRODUCTION

En France, l'inventaire et la surveillance des sols sont assurés par une structure nationale assez originale en Europe et dans le monde, le GIS Sol (Arrouays *et al*., 2022). Cette structure partenariale permet de fédérer à l'échelle nationale des actions harmonisées d'acquisition, de diffusion et de valorisation des données sur les sols, en co-construisant un programme qui associe les pouvoirs publics, les instituts de recherche et de développement, les agences à vocation de gestion de l'environnement et des territoires, les utilisateurs des données. L'échelle privilégiée est celle du territoire[1] ou de la France entière. La convention-cadre la plus récente qui régit le GIS Sol (2019) définit ainsi ses missions : « (i) concevoir, orienter, coordonner et assurer… des actions d'inventaire des sols et de suivi de leur qualité, notamment par le déploiement d'indicateurs, (ii) mettre en place, développer et gérer un système d'information sur les sols et les services écosystémiques auxquels ils participent pour répondre aux demandes des pouvoirs publics et de la société et contribuer à l'expertise, notamment dans le domaine des risques, (iii) faciliter la concertation et la coopération entre ses membres autour de l'information sur les sols pour favoriser l'interopérabilité avec d'autres systèmes d'information et valoriser davantage ses données pour aider à leur appropriation et à leur réutilisation, et (iv) harmoniser et coordonner les programmes nationaux avec les programmes européens ou internationaux de même nature ». De par les informations multiples qu'il produit et met à disposition, le GIS Sol constitue ainsi une structure stratégique pour accompagner l'élaboration et la mise en œuvre des politiques publiques en lien avec les questions agricoles et environnementales. Les données issues des programmes qu'il pilote sont ainsi mobilisées pour répondre aux demandes des pouvoirs publics et de la société, tout en s'appuyant sur les acquis les plus récents de la recherche.

La journée des 20 ans du GIS Sol, qui s'est tenue le 6 décembre 2021[2], a été l'occasion de dresser un bilan de son action. Elle a permis également d'écouter les besoins des acteurs en matière d'acquisition et d'utilisation de données sur les sols. Le rôle clé du GIS Sol et la nécessité de sa pérennisation pour une meilleure connaissance des sols ont été réaffirmés. Le GIS Sol a par exemple joué un rôle dans l'émergence d'initiatives de l'Union européenne ou des Nations Unies (European Soil Data Centre, Panagos *et al*., 2012 ; Partenariat mondial sur les sols de la FAO, lancé en 2012, https://www.fao.org/global-soil-partnership/partners/fr/). Pour autant, de nombreux pays ou continents considèrent que l'information sur les sols est encore trop fragmentée pour qu'une gouvernance globale puisse se mettre facilement en place à cette échelle (*e.g.* Montanarella et Vargas, 2012 ; Ortiz Garcia *et al*., 2022).

Les besoins d'informations sur les sols ont déjà fait l'objet de bilans fondés sur l'analyse des demandes d'information reçues au niveau national (Richer-de-Forges *et al*., 2010), ainsi que des besoins spécifiques de données cartographiques exprimés par des producteurs et des utilisateurs (Richer-de-Forges *et al.,* 2019). Elle est ici actualisée et élargie à l'ensemble des données et des missions du GIS Sol. De larges consultations publiques ou ciblées, préalables au projet de Directive-cadre sur la protection des sols de la Commission européenne du 22 septembre 2006 (CEE, 2006), puis dans le cadre de la nouvelle communication

1 Par territoire, on entend des espaces administratifs (commune, canton, département région...) ou des régions naturelles ou pays traditionnels, espaces d'étendue limitée présentant des caractères physiques et une occupation humaine homogènes.

2 Vidéos et diaporamas de la Journée « Les 20 ans du Gis Sol » disponibles sur le site web du Gis Sol : https://www.gissol.fr/evenements/le-gis-sol-fete-ses-20-ans-5582

sur le « European Green Deal » (Commission européenne, 2020) ont déjà été organisées par le passé.

Cet article a pour objectif de partir d'un bilan de la connaissance des sols et du GIS Sol et de l'expression des besoins, pour proposer des pistes d'évolution du GIS Sol. Ces perspectives n'engagent pas le GIS Sol ; elles ont vocation à l'aider dans ses réflexions, ses décisions étant du ressort de ses instances de gouvernance qui prennent en compte des considérations stratégiques et de moyens. Le bilan et l'expression de besoins sur la connaissance des sols sont basés sur : i) une enquête en ligne largement diffusée, entre septembre 2021 et février 2022 et qui a collecté 203 réponses ; ii) une table ronde d'acteurs de la gestion des sols, auteurs de cet article, qui a eu lieu le 6 décembre 2021 lors de la journée consacrée aux 20 ans du GIS Sol et qui a rassemblée en mode virtuel 300 participants[3]. Ces deux contributions font l'objet des deux premières parties. La troisième partie esquisse des perspectives scientifiques et techniques pour l'inventaire et la surveillance des sols, qui découlent de cette journée et de l'état de l'art scientifique, ou de la réflexion de membres du GIS Sol.

2. LES BESOINS EXPRIMÉS PAR UNE ENQUÊTE LARGEMENT DISTRIBUÉE AUPRÈS D'ACTEURS DE LA GESTION DES SOLS

L'enquête : ses objectifs, ses répondants, leurs attentes par rapport à une information sur les sols

L'enquête en ligne a été réalisée pour consolider la liste des besoins et attentes des utilisateurs et producteurs des données sur les sols. Elle avait deux objectifs : mieux connaître les gestionnaires des sols de manière large, leurs champs d'intérêt, qu'ils soient ou non utilisateurs des données du GIS Sol, de mieux cerner leurs besoins ; savoir si le portail internet du GIS Sol leur était familier, s'il répondait à leurs attentes, tant en termes de contenu, de données que d'ergonomie pour son utilisation. Les résultats sont détaillés par ailleurs (Le Bas *et al.*, 2022). La capitalisation de ces informations et expressions de besoins s'inscrit notamment dans le projet de refonte du site internet du GIS Sol dont l'aboutissement est prévu pour 2023.

Cette enquête a fait l'objet d'envois par courrier électronique, utilisant le réseau d'échange de l'Association française d'étude des sols (AFES), et d'envois ciblés groupés par les membres et les partenaires du GIS Sol. Elle a été annoncée sur son site internet et ceux de ses membres. 203 répondants ont renseigné le questionnaire, dont 128 l'ont rempli totalement et 75 partiellement. Les réponses viennent d'une grande diversité d'acteurs, les catégories les plus représentées étant les chercheurs et enseignants-chercheurs (19 %), les agents d'Établissements publics (16 %) ou de services de l'État (hors enseignement et recherche) (15 %) et, dans une moindre mesure, la profession agricole et forestière (8 %) et les bureaux d'études (8 %). Les autres répondants sont divers (étudiants, industriels, collectivités territoriales, journaliste, association environnementale…)

La grande majorité des répondants (91 %) se dit « utilisateur » de données ou d'informations sur les sols, une part importante (49 %) se dit « producteur » de données ou d'informations sur les sols, cette part étant probablement un sous-ensemble des 91 %, une partie des utilisateurs étant aussi producteurs de données. 59 % des répondants se considèrent comme utilisateurs « avertis », et 41 % comme utilisateurs « néophytes », cette dernière réponse provenant autant de chercheurs (donc d'autres disciplines que la science du sol) que d'autres utilisateurs. 54 % des répondants utilisent les données sols de manière occasionnelle, 46 % de manière régulière. 90 % des répondants sont demandeurs de données ou d'informations, parmi lesquels 85 % concernent des données et 64 % des informations générales sur les sols, leurs propriétés, leurs fonctions, sans mobilisation spécifique de données.

L'enquête : les sources d'information, échelles et thématiques d'intérêt

Les résultats de l'enquête indiquent que les sources d'informations mobilisées par les répondants sont diverses (*Figure 1a*) : le Géoportail (95 %) (par la carte des sols au 1/250 000, fruit d'une collaboration entre les membres du GIS Sol, et du fait du lien qu'il permet aux données des partenaires locaux) (Messant *et al.*, 2021), le portail du GIS Sol (59 %) qui donne accès aux données de ses différents programmes, puis les portails d'INRAE, du BRGM, de l'AFES et de l'Ademe. Le portail du RMT Sols et Territoires n'est utilisé que par 22 % des répondants et ceux des Chambres d'agriculture par 19 %. Ces sources d'informations sont mobilisées différemment selon l'appartenance des répondants (*Figure 1*).

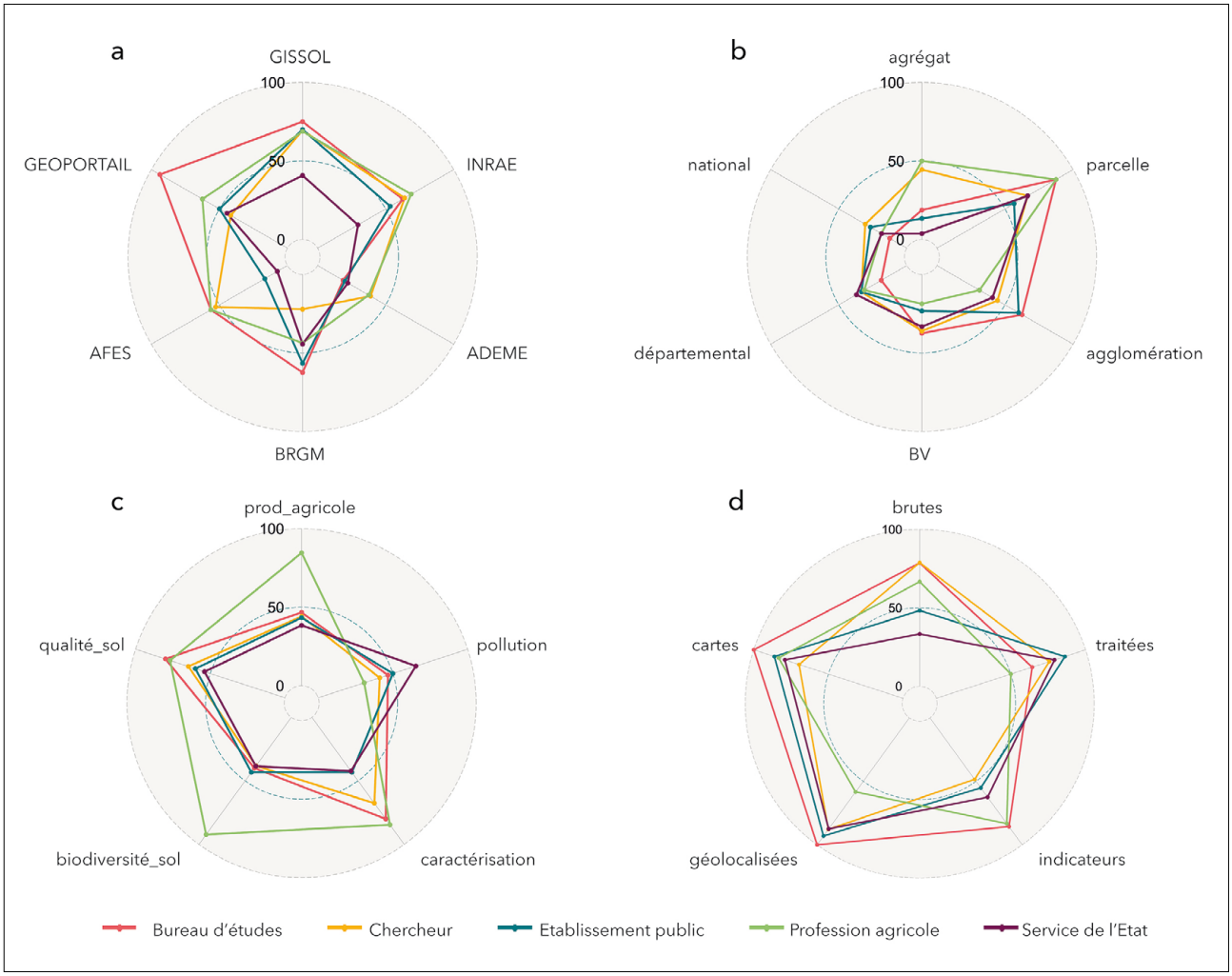
Dans une question à choix multiple possible, la moitié des répondants se dit intéressée spécifiquement par les sols agricoles. Viennent ensuite les sols urbains et péri-urbains, les sols des espaces naturels, les sols forestiers (chacun entre 20 et 25 %), et enfin les sols industriels (16 %). 40 % se disent intéressés par tous les types de sol.

Les échelles d'intérêt ont été questionnées (*Figure 1b*). La parcelle représente le niveau d'organisation spatiale d'intérêt le plus haut (66 %), suivi par le territoire, entendu comme

3 https://www.gissol.fr/journee-des-20-ans-du-gis-sol-table-ronde-sur-les-besoins-en-donnees-sur-les-sols

Figure 1 - La source actuelle et le besoin d'information sur les sols, exprimée par catégorie de répondants à l'enquête en ligne, en pourcentage de chaque catégorie (choix multiples possibles) : a) source actuelle d'information sur les sols ; b) échelle d'intérêt ; c) propriétés d'intérêt ; d) format de diffusion des données.

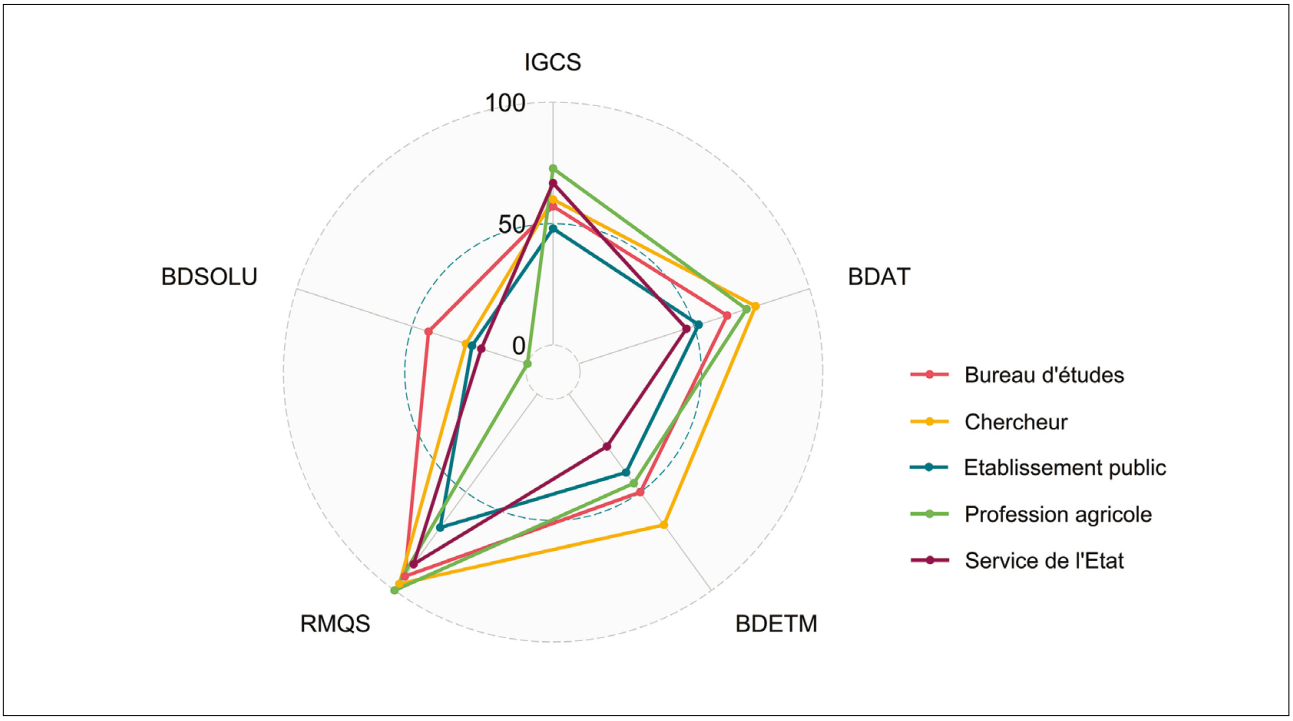
Figure 1 - *The current source and the needs of information on soils from the answers to the on-line questionnaire, expressed as a percentage of the response by type of actors on: a) their source of information; b) scale of interest; c) properties of interest; d) format of interest to disseminate the data.*



« agglomération » (48 %), ou comme « bassin-versant » (31 %). L'intérêt pour le niveau de l'agrégat est assez présent (23 %), comme l'est aussi le niveau national (19 %) (*Figure 1b*). Ces réponses indiquent donc des besoins à des niveaux d'organisation spatiale autres que ceux, nationaux ou régionaux, privilégiés par les programmes du GIS Sol. En effet les échelles cartographiques de ces programmes vont typiquement du 1/1°000 000 au 1/250°000, et plus rarement au 1/50°000 voire au 1/25°000 ou infra. Le développement de produits à des échelles très détaillées, en particulier à partir de la cartographie numérique (Voltz *et al.*, 2020), correspond donc à une attente.

Les thématiques d'intérêt (*Figure 1c*) sont la « qualité des sols » de manière générale (63 %), la caractérisation et la typologie des sols (55 %), leur biodiversité (50 %), leur pollution (49 %), leur potentiel de production agricole (48 %). D'autres enjeux sont cités dans 35 à 45 % des réponses : érosion, qualité des eaux, adaptation au changement climatique, santé-environnement, services écosystémiques, stockage du carbone, artificialisation des sols, aménagement, cycle de l'eau, risques (de manière générale). Les thématiques d'intérêt sont donc très larges et englobantes, ainsi qu'en atteste, à travers l'enquête, la part élevée de répondants (80 %) qui voient d'abord le sol par les différents services écosystémiques auxquels il contribue (Adhikari *et al.*, 2016 ; Bispo *et al.*, 2016 ; Eglin *et al.*, 2021 ;

Figure 2 - La connaissance des programmes du GIS Sol, selon les catégories de répondants.
Figure 2 - *Knowledge of GIS Sol programs, according to the type of actors.*



Fossey *et al*., 2020) et 76 % comme un espace recouvrant bien 4 dimensions (volume x temps).

L'enquête : la connaissance du GIS Sol, de ses programmes, des besoins des répondants

Le GIS Sol est bien connu des répondants (78 %), avec des niveaux de réponses très élevés pour les bureaux d'études, la profession agricole et les chercheurs (entre 89 et 93 %). Parmi les répondants connaissant le GIS Sol, 68 % sont également informés des données qu'il produit et 86 % de son site internet. Les chercheurs connaissent mieux les données que les autres catégories de répondants (90 % contre environ 70 %). Cependant, cette connaissance demeure élevée pour les 5 principales catégories d'acteurs considérées.

Les programmes relatifs au Réseau de Mesure de la Qualité des sols (RMQS), à l'Inventaire, la Gestion et la Conservation des Sols (IGCS), à la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) sont connus de plus de la moitié des répondants. Le RMQS est le programme le plus connu de chaque catégorie de répondants. La BDAT et l'IGCS sont moins connus mais restent à un niveau supérieur ou proche de 50 %. En revanche, la BDETM et la BDSoLU sont moins connues. Ces faibles niveaux de visibilité ne sont pas surprenants, compte tenu de l'arrêt temporaire de la collecte de la BDETM depuis 2009 et du lancement récent de la BDSolU qui ne concerne que les sols des milieux urbains. La BDETM est surtout connue des chercheurs tandis que la BDSolU l'est surtout des bureaux d'études. 41 % des répondants connaissent le conservatoire des sols. Ce dernier est surtout connu des bureaux d'études, des chercheurs et de la profession agricole.

51 % des répondants, avec de l'ordre de 60 % pour les chercheurs et 40 % pour les services de l'état ou bureaux d'études, déclarent que les données actuellement mises à disposition par le GIS Sol sur son site internet « répondent bien à leurs besoins ». Cette réponse traduit des marges de progression.

Si les données sont facilement accessibles sur le site du GIS Sol pour une majorité des répondants (60 %), 40 % expriment des difficultés. Les freins exprimés sont l'accès (73 %), qui peut recouvrir la localisation, la nature, le format des données, leur téléchargement, et le temps (34 %), qui peut concerner des difficultés d'accès ou plus généralement de prise en main des données.

Pour les utilisateurs qui se considèrent « avertis », les données recherchées sont les types de sols (classification pédologique) (97 % des utilisateurs), la profondeur (69 %), la texture (65 %), le réservoir en eau utilisable (61 %), la teneur en matières organiques (61 %), le carbone organique et la biodiversité (49 %). Entre 30 et 40 % des utilisateurs recherchent aussi les concentrations en éléments majeurs, en Éléments Traces

Métalliques (ETM), en Produits Organiques Persistants (POP), en phosphore et en carbonates. Pour les utilisateurs qui se disent « néophytes », les données recherchées sont similaires mais avec un classement un peu différent, et toutes légèrement plus basses : les types de sols (84 %), la matière organique (53 %), la texture, le réservoir en eau utilisable ou la biodiversité (tous trois à 51 %), les POP (47 %) et le carbone (41 %) ; la profondeur, les pesticides, les ETM et les éléments majeurs se situent entre 30 et 40 %.

3. LES PERSPECTIVES EXPRIMÉES PAR DES ACTEURS DE LA GESTION DES SOLS

Cette seconde partie synthétise les besoins exprimés lors d'une table ronde d'acteurs de la gestion des sols[4], qui a eu lieu lors de la journée des 20 ans du GIS Sol, le 6 décembre 2021.

3.1. Des spécificités par type d'usage des sols

Les besoins exprimés par les intervenants sont d'abord et logiquement liés à leurs activités.

Ainsi, les acteurs de l'aménagement urbain s'intéressent en premier lieu aux fonds pédo-géochimiques, information nécessaire pour identifier des pollutions, ou à la caractérisation des remblais qui peuvent constituer, dans certaines situations, la majeure partie des sols d'une ville (cas de la ville du Havre) et dont la qualité détermine les usages et la gestion.

Les acteurs de la gestion forestière soulignent l'importance du pH, des éléments grossiers, des formes d'humus, du réservoir en eau utilisable, tous nécessaires pour la gestion des milieux forestiers (exploration des arbres en profondeur, dans des sols à forte teneur en éléments grossiers, engorgés, sur des substrats géologiques spécifiques…), jusqu'à suggérer une BDAT spécifique des sols forestiers. En effet, l'actuelle BDAT fournit des moyennes spatiales (canton, petite région agricole…) qui n'intègrent que les données de sols agricoles, ce qui en limite fortement l'intérêt pour les forestiers.

Les acteurs de la gestion agricole sont particulièrement intéressés par des données sur la vie dans les sols, dont la microbiologie, pour mieux construire des indicateurs de qualité des sols en lien avec des enjeux de durabilité des agroécosystèmes.

4 Agriculteur, AgroParisTech, CNPF, Laboratoire d'Initiative Foncières et Territoriales innovantes, Mairie du Havre, Santé Publique France

3.2. De nouvelles sources de données, de nouveaux besoins d'information

De nouvelles sources de données ont été mentionnées, que leur production soit déjà opérationnelle, en cours de développement, ou évoquée comme des besoins futurs. Les développements technologiques peuvent être longs car ils passent souvent par une phase de recherche, de tests puis d'opérationnalisation.

La télédétection constitue une de ces nouvelles sources d'information. Elle « a depuis longtemps contribué à la cartographie des sols qui est actuellement en plein renouveau, du fait d'instruments nouveaux », précise Emmanuelle Vaudour, enseignante-chercheure à AgroParisTech, experte en télédétection et géographie des agroécosystèmes. Réaliser ou mettre à jour les cartes de propriétés des sols telles que celle du carbone organique du sol devient nécessaire pour faciliter leur gestion territoriale, en adéquation avec les politiques publiques qui visent à promouvoir le stockage de carbone du sol et en lien avec l'initiative internationale 4p1000 (https://4p1000.org/). Des approches fondées sur la proxi-détection ou la télédétection dans le domaine visible (Vis), proche infra-rouge (PIR) et moyen infra-rouge réflectif (MIR) (400-2 500 nm) ont été mises au point, au moyen de spectroscopie de laboratoire (*e.g.*, Barthès et Chotte, 2021), de capteurs aéroportés hyperspectraux (*e.g.*, Gomez *et al.*, 2012) ainsi que, dans la dernière décennie, de divers capteurs satellitaires, à des niveaux d'organisation spatiale et pour des contextes géographiques variés (Vaudour *et al.*, 2022). Ces approches reposent sur l'identification de caractéristiques spectrales remarquables de plusieurs propriétés de sol, telles que la teneur en argile, en carbonate de calcium, en fer, en carbone organique, avec des pics spécifiques d'absorption, notamment dans le MIR (Vaudour et Girard, 2010 ; Barthès et Chotte, 2021).

Pour les teneurs en carbone organique du sol en particulier, la plupart des travaux fondés uniquement sur des informations spectrales satellitaires sont récents, publiés depuis 2019 seulement, et ont porté sur des sols de grandes cultures, de climats tempérés, en Europe, en Chine et en Amérique du Nord (Vaudour *et al.*, 2022). Ces approches satellitaires se sont développées du fait de la mise à disposition récente et gratuite de séries temporelles telles que celles issues de Sentinel-2, programme Copernicus de l'Agence Spatiale Européenne, de résolution spatiale fine (10-20 m), de fréquence hebdomadaire, et disposant de bandes spectrales réparties dans le domaine Vis-PIR-MIR. Ces nouvelles données ont stimulé des travaux sur les facteurs perturbant la prédiction du carbone organique du sol, tels que l'humidité et/ou la rugosité de surface (*e.g.* Vaudour *et al.*, 2019a ; Urbina-Salazar *et al.*, 2021), les conditions atmosphériques (Gomez *et al.*, 2022), ou la présence de résidus végétaux en surface du sol (Castaldi *et al.*, 2019). La compréhension de l'influence de ces facteurs et leur prise en compte dans les modèles, recourant ou non à des données ancillaires non spectrales, conditionnent la

faisabilité des démarches et leur opérationnalité à moyen, voire court terme. Des travaux sont développés dans des contextes agropédoclimatiques variés, dans le cadre du projet européen STEROPES (https://ejpsoil.eu/research-projects/steropes/) (2021-2024). Il s'agit donc d'une offre en développement qui nécessite (i) des données de calibration obtenues à partir d'analyses de sols, spatialement denses, récentes et de qualité, (ii) des compétences scientifiques et d'ingénierie de la donnée, des infrastructures de données pour archiver et traiter de gros volumes de données.

Parmi les nouvelles sources d'information, le thème de la biologie des sols, de plus en plus présent dans les programmes du GIS Sol, mériterait également d'être développé ici. À titre d'exemple, soulignons l'acquisition de données de biologie des sols, dans le cadre d'une démarche de test sur le RMQS, le développement d'une chaîne d'analyse sur la biologie du sol et la construction d'indicateurs du fonctionnement biologique des sols en support au conseil agronomique[5], qui pourraient permettre à terme d'élargir aux données de biologie des sols, le spectre des données fournies par la BDAT.

Les données issues de la société civile, ou des sciences et recherches participatives, doivent également être mentionnées. Ces données sont diverses (morphologiques, physiques, chimiques et biologiques), et portent sur une grande diversité d'écosystèmes (voir Ranjard *et al*., 2022 pour une synthèse). Ces données pourraient être utilement capitalisées, à condition de les qualifier, de les traiter, de les croiser et de les compléter avec d'autres données, en matière de densité spatiale ou de type de propriétés.

Antoine Ilef, Chargé de projet Environnement et développement durable de la ville du Havre, souligne « l'importance de l'acquisition de données faite lors de travaux d'aménagement urbain ou lors de transactions immobilières », et propose de les partager avec le GIS Sol. Cette proposition mérite attention, d'autant plus que les métropoles acquièrent de plus en plus de données sur la pollution du sol, dans le cadre d'obligations à l'aménagement urbain. Mais c'est également le cas des forestiers qui relèvent des données pédologiques lors de diagnostics sylvo-climatiques, notamment lors du renouvellement des peuplements. Il est essentiel pour eux d'investir dans la connaissance des sols face aux contraintes du changement climatique. Il s'agit notamment, dans ces opérations, d'améliorer l'estimation du réservoir en eau utilisable, lequel permet, lorsqu'il est grand, d'atténuer les impacts de la variabilité climatique. En lien avec les nouvelles méthodes de récolte du bois énergie, des indicateurs de sensibilité des sols à une récolte accrue de biomasse ont été développés (projet INSENSE[6]). De même, des données sur les sols agricoles sont acquises dans le cadre de projets de sciences et recherches participatives telles que l'OAB (Observatoire Agricole de la Biodiversité), l'OPVT (Observatoire participatif des Vers de Terre), le REVA (Réseau d'expérimentation et de veille à l'innovation agronomique) (Ranjard *et al*., 2022).

Enfin, les intervenants ont mis en évidence des besoins peu ou encore très partiellement couverts qui mériteraient d'être davantage investigués. À titre d'exemple, la pollution des sols est souvent caractérisée parmi de multiples contaminants minéraux (arsenic, cadmium, cuivre, mercure, plomb, zinc…) ou organiques (dioxines, furanes…), d'origines diverses (antibiotiques, pesticides, résidus de plastiques…), souvent d'origine anthropique. Une attente forte est de caractériser l'impact combiné des mélanges de molécules (effet « cocktail ») sur la santé humaine (Raia *et al*., 2019) . Pour cela, il est nécessaire d'acquérir des connaissances sur la toxicité de ces mélanges mais aussi de mieux connaitre les expositions humaines à ces mélanges. Le PNSE4 (4e plan national santé-Environnement) a inscrit ce besoin dans ses priorités ; au travers de son action 18, ce plan prévoit la création d'un espace commun de données environnementales pour la santé, sous l'acronyme « Green Data for Health » (GDH4H), à savoir une plateforme visant à faciliter l'accès aux données environnementales disponibles dans les différentes bases de données, dont celles sur les sols, pour la communauté des chercheurs en santé-environnement.

Des innovations méthodologiques sont également attendues, par exemple, sur la caractérisation de la stabilité de la matière organique, ou la mobilité, l'extraction et la biodisponibilité des contaminants… Ainsi, il a été suggéré que le GIS Sol puisse, de manière plus visible qu'il ne le fait déjà, constituer un dispositif test et démonstrateur de nouvelles méthodes d'analyses des sols.

3.3. Le croisement des données, la mise en relation de communautés d'experts, allant de l'usage de la donnée au pilotage d'actions

Les données sur les sols sont souvent croisées avec des données relatives à d'autres compartiments de l'environnement (végétation, eau, air…), ou à des activités humaines exerçant des pressions sur les écosystèmes (usage des sols, pratiques de gestion, infrastructures de transport…). Ce croisement, souvent basé sur des relations statistiques partielles, mériterait d'être plus construit sur des processus, ce qui nécessiterait la mise en relation de communautés d'experts. Dans le domaine santé-environnement, il s'agit de croiser des données sur les sols, comme marqueurs de pressions et vecteurs d'exposition, avec des données sur les activités humaines, l'environnement, la santé, l'alimentation. Dans le domaine de la gestion foncière, il s'agit de croiser des données sur les sols, comme marqueurs

5 https://www.aurea.eu/conseil-2/services-2/

6 INSENSE : https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/1262-insense-indicateurs-de-sensibilite-des-ecosystemes-forestiers-soumis-a-une-recolte-accrue-de-biomasse.html

de leur histoire, avec des données socio-économiques relatives à leurs usages. Ceci pose la question de l'interopérabilité des bases de données et de la façon dont, par leur conception, elles permettent ou non cette mise en commun des paramètres qu'elles renseignent. Un besoin exprimé est que le GIS Sol puisse, avec d'autres acteurs, contribuer à la construction de communautés d'acteurs (santé, climat, aménagement…) afin de rendre plus facile et plus pertinent le croisement de données sur les sols avec celles d'autres thématiques.

Des besoins ont également été exprimés autour de l'usage des données, par l'échange d'expérience dans leur utilisation, prenant en compte leur compatibilité et leur pertinence. Par exemple, « sur le foncier, l'usage des données pour la gestion des friches, l'arbitrage à leur renaturation ou non, pourrait bénéficier d'échanges entre acteurs » témoigne Marc Kaszynski, précédemment directeur de l'Etablissement public foncier Nord-Pas-de-Calais et Expert Aménagement du Territoire au Laboratoire d'Initiatives Foncières et Territoriales Innovantes (LIFTI). Plus généralement, l'intérêt de favoriser les liens entre les utilisateurs des données sol d'un même secteur d'activité ou d'usage des sols a été mentionné, par exemple, pour les acteurs agricoles, entre les chambres d'agricultures (CA), les coopératives d'utilisation de matériels agricoles (Cuma), les réseaux et le centre de ressources agricole et rural (Trame).

Enfin, des besoins ont été exprimés « pour passer des données sur les sols, à leur utilisation pour le pilotage de la gestion des sols », point souligné par Yves François, agriculteur dans l'Isère, élu de la chambre d'agriculture de Rhône-Alpes. Passer de l'observation à une recommandation d'action pour améliorer la qualité des sols n'est pas immédiat. Cela nécessite une appropriation des données, de leur signification, de leur précision et de leur fiabilité, l'élaboration d'indicateurs, mais aussi de référentiels de valeurs, autant d'étapes pour lesquelles les acteurs de la gestion du sol sont souvent démunis. Ce point est fortement souligné dans la littérature internationale, afin de passer du *Digital Soil Mapping* de propriétés ou de types de sol, au *Digital Soil Mapping Assessment* qui vise à évaluer la qualité des sols dans le contexte actuel ou celui envisagé (*e.g.*, Kidd *et al*., 2020 ; Arrouays *et al*., 2021).

Une vigilance est de mise sur le plan juridique dans la valorisation des données, que les données soient issues d'agriculteurs ou d'autres publics, privées ou de bien commun public, en relation avec les finalités d'usage.

3.4. Des enjeux montants sur les relations entre sol et santé humaine

L'enjeu de santé recouvre des besoins de données très importants et extrêmement divers. Les sols peuvent avoir des effets sur la santé humaine, directement par ingestion de sol (par exemple par les enfants dans les cours d'école, les jardins…) ou par inhalation suivie de déglutition pour les travailleurs agricoles, ou indirectement par absorption de contaminants par les plantes ou les animaux (y compris de virus entériques de l'homme). L'ingestion peut être, dans certaines situations, problématique (cas des animaux contaminés par le chlordécone[7] par exemple), tout comme la voie indirecte par transfert vers la plante puis vers l'homme par l'alimentation humaine (cas du cadmium ou du mercure par exemple). L'exposition à la pollution des sols peut également intervenir par transfert vers d'autres milieux, comme l'eau ou l'air (produits médicamenteux, pesticides…) (Rai *et al*., 2019). À cette complexité des voies d'exposition, s'ajoute l'immense variété des composés inclus naturellement dans la matrice sol, avec des degrés divers de disponibilité et biodisponibilité, dont la mesure n'est pas toujours scientifiquement établie (Froger *et al*., 2021). Le besoin est donc large, que l'on considère les pressions liées aux activités humaines ou simplement les fonds pédo-biogéochimiques. Ceux-ci sont essentiels, car ils fournissent des références pour évaluer les impacts de pollutions ponctuelles accidentelles sur les sols.

Cet enjeu de santé s'inscrit plus largement dans le concept du « One Health » (Humboldt-Dachroeden *et al*., 2020), « une seule santé », initié au début des années 2000, promu par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE) et l'Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO), et formalisé en 2010 par un accord tripartite entre ces organisations afin de collaborer sur cette thématique. L'évaluation des fonctions et services écosystémique des sols y est essentielle, pour souligner « l'importance des sols, comme composante essentielle de la santé des écosystèmes et de la santé humaine, une dimension santé que le GIS Sol pourrait mettre davantage en avant », fait valoir Sébastien Denys, Directeur Santé-Environnement-Travail à Santé Publique France.

4. LES PERSPECTIVES POUR L'INVENTAIRE ET LA SURVEILLANCE DES SOLS

Le GIS Sol assure l'acquisition, la capitalisation et la diffusion de données acquises sur les sols agricoles, forestiers et urbains à travers les différents programmes qu'il porte, et en lien avec de nombreux partenaires régionaux et laboratoires. Depuis 2001, année de création du GIS Sol, ces programmes ont fortement évolué de manière à être en adéquation avec les demandes des utilisateurs et des politiques publiques et à intégrer les évolutions scientifiques et technologiques : développement de

7 Le chlordécone est un insecticide organochloré toxique, écotoxique et persistant.

la cartographie numérique des sols, amélioration progressive des connaissances des sols de France (polluants, carbone organique, biodiversité microbienne…), déploiement de tests divers. Des perspectives ont été émises pour chacun de ces programmes, s'appuyant sur les compétences du GIS Sol et sur les recommandations des évaluations scientifiques et politiques[8]. L'objectif de cette partie est d'esquisser des perspectives scientifiques et techniques plus générales, en lien avec les besoins exprimés par l'enquête et les divers acteurs de la gestion des sols, tout en intégrant l'état de l'art scientifique et les dynamiques impulsées par le GIS Sol lui-même.

4.1. Quelle capitalisation des données produites hors du GIS Sol ?

La montée des questions liées aux sols à l'agenda international (partenariat mondial sur les sols de la FAO, Montanarella *et al.*, 2016 ; Montanarella et Vargas, 2012 ; Acocella, 2015 ; Amundson *et al.*, 2021), ou européen (Commission européenne, 2020 ; Panagos *et al.*, 2022) mobilisera de nombreux acteurs, en particulier ceux de la gestion des sols (agriculteurs, forestiers, aménageurs…), de la gestion de l'eau (agences de l'eau), de la santé (médecins, épidémiologistes…) et de la gestion des territoires (collectivités territoriales), ainsi que diverses associations citoyennes (traitant d'environnement, de consommation…), que ce soit dans l'acquisition ou dans la capitalisation et la diffusion des données sur les sols. Les sols sont désormais reconnus comme au carrefour d'enjeux multiples et au cœur des objectifs du développement durable (McBratney *et al.*, 2014 ; Keesstra *et al.*, 2016 ; Bouma *et al.*, 2014). Cette acquisition de données a de tout temps été importante au travers de différentes commandes publiques (collectivités territoriales, agences de l'eau…) et privées (coopératives…), mais leur capitalisation, en particulier au sein du système d'information Sol du GIS Sol (DoneSol, et plus récemment BDSolU sur les sols urbains) s'est avérée lente pour répondre à ces enjeux.

Plusieurs facettes sont importantes à considérer. Tout d'abord, une prise de conscience politique tardive de l'importance des sols et de leur protection a sans doute contribué à un investissement qui n'était pas à la hauteur des enjeux futurs, malgré la constitution du GIS Sol. Il suffit de constater les impacts sur l'acquisition de données qu'ont eu certaines politiques européennes, comme, par exemple, le reclassement des zones défavorisées (https://agriculture.gouv.fr/aides-aux-exploitations-classement-en-zone-defavorisee) ou le lancement de l'étude BioSoil de l'Union Européenne (Lacarce *et al.*, 2009) sur l'augmentation subite des budgets des programmes IGCS et RMQS, pour se rendre compte que, malgré une anticipation louable par la création du GIS Sol, les politiques publiques européennes et nationales n'ont sans doute pas mesuré au départ l'importance des enjeux et des moyens à y consacrer. Mais le monde de la recherche n'a sans doute pas su alerter à temps les pouvoirs publics sur les enjeux associés à la fourniture d'informations adaptées et facilement compréhensibles pour un public non averti. La science du sol n'a pas communiqué de façon suffisante avec les pouvoirs publics et les citoyens pendant une période qui semble heureusement révolue. Elle a néanmoins rendu possible l'accès à des données dont le potentiel n'était pas au départ exploitable en masse, comme le permettent désormais certaines technologies à haut débit (microbiologie, télédétection, spectrométrie…), selon une tendance qui s'amplifiera avec les progrès des sciences et des technologies, des infrastructures de données.

Cette accélération de l'acquisition des données devra s'accompagner d'un travail auprès de toutes les parties prenantes pour que la pérennisation des données dans des bases de données soit, dans toutes les situations, explicitement prévue, financée, discutée avec le GIS Sol, pour adapter la capitalisation, la qualification, le traitement de données multiples et multiformes, au risque sinon de payer plusieurs fois de telles acquisitions, ou de perdre de l'information. *A minima*, si les données ne sont pas partagées et archivées, « bancarisées », il faudra porter à connaissance l'existence de travaux réalisés dans le système d'information prévu à cet effet, comme Refersols[9]. Trois exemples, à des stades de développement différents, peuvent être donnés à l'appui :

- Le programme 4p1000, dans sa déclinaison opérationnelle des labels bas carbone, a prévu l'acquisition de données pour réaliser à la fois un état initial et un suivi des stocks de carbone du sol dans les exploitations agricoles engagées. Cette acquisition importante doit être cataloguée et alimenter les programmes du GIS Sol, ainsi que les bilans régionaux et nationaux ;
- L'objectif du « zéro artificialisation nette », inclus dans la loi « climat et résilience », ou encore le 4e plan national Santé – Environnement (PNSE4), nécessiteront, dans leurs déclinaisons opérationnelles, des acquisitions de données sur les sols qui pourront varier selon les initiatives locales et pourront permettre des mises en relation avec d'autres données de l'environnement, de la qualité de l'alimentation ou de l'état de santé des populations
- Le développement des sciences et recherches participatives conduit à des données portant sur une question scientifique plus ou moins large, parfois proches des objectifs du GIS Sol. Ces questions portent, par exemple, sur la biodiversité des sols selon leur mode de gestion, ou encore sur la cartographie des sols (Ranjard *et al.*, 2022).

Si le premier exemple se fonde sur des méthodologies certifiées, les deux autres peuvent faire appel à des données moins normées, et donc nécessiter un important travail pour les

8 https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/cgaaer_16080_2017_rapport.pdf

9 Refersols : https://webapps.gissol.fr/georefersols/

qualifier. Le dernier exemple fait clairement appel à des données fournies par des acteurs non experts du sol. Un cadre générique pourrait être proposé à ces initiatives afin de les soutenir, en leur fournissant des éléments pour prévoir et permettre la pérennisation, ou « capitalisation », des données acquises. Plus généralement, le traitement de certaines données issues des sciences participatives pose des questions scientifiques nouvelles, notamment sur leur validation, leur incertitude et leur intégration en complément de données certifiées (Rossiter *et al.,* 2015)

L'objectif d'une plus grande capitalisation de l'information engendre un besoin d'harmonisation des méthodes (prélèvements, analyses, traitements des données, interprétations selon des référentiels, etc.), voire de correction d'indicateurs inadéquats quand c'est le cas. Quoi qu'il en soit, les méthodes évolueront et continueront d'évoluer et il est essentiel de veiller à leur traçabilité totale, de façon à pouvoir établir *a posteriori* des fonctions de passage de méthodes ou d'indicateurs à d'autres (voir par exemple, pour le phosphore Hu *et al.*, 2021). C'est aussi un des intérêts du conservatoire européen des échantillons de sol en conditions contrôlées.

4.2. Quel périmètre pour un suivi des sols dans le contexte renouvelé des services écosystémiques des sols et de la santé globale ?

Les champs d'intérêt sur le sol ont pris une ampleur nouvelle. La santé des écosystèmes et la santé humaine, dans le cadre du concept « One Health » (Humboldt-Dachroeden *et al.*, 2020) appellent à des données nouvelles (données brutes, traitées, ou sous forme d'indicateurs des fonctions et services écosystémiques des sols).

Le GIS Sol cible la caractérisation des sols, de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. S'il élargit son champ à la construction et la diffusion d'indicateurs complexes sur les fonctions et services (et disservices) écosystémiques rendus par les sols, qu'ils soient issus de sorties de modèles ou d'assemblage de données sur les sols ou avec d'autres données de contexte ou d'usage, son activité s'élargira considérablement. Il faudra qu'il mette à disposition des cadres méthodologiques et d'interprétation, des référentiels.

La demande en données qui résultera de ces initiatives peut apparaitre assez considérable et doit être anticipée. Des arbitrages devront être faits entre ce qui sera réalisé par le GIS Sol lui-même et ce qui pourra être délégué à des partenaires. Ces arbitrages pourront prendre en considération, d'une part, le développement de cadres opérationnels et de méthodes sur les fonctions des sols et les services écosystémiques et, d'autre part, le développement d'applications opérationnelles, notamment aux échelles territoriales.

Les besoins exprimés ont aussi porté sur la production de données nouvelles sur les sols, soit pour actualiser les suivis actuels, soit pour en engager de nouveaux (pesticides, biodiversité, microplastiques…), soit encore pour utiliser le potentiel des images satellitaires à haute résolution spatiale et spectrale (Vaudour *et al.*, 2019a, 2019b) ainsi que de nouvelles données aéroportées comme la gammamétrie (Loiseau *et al.*, 2020). Une réponse pourra consister à amplifier des collaborations, par exemple avec le CNES, dans le cadre du pôle Théia sur la cartographie numérique des sols, ou avec l'Anses, l'Ineris, Santé publique France, sur le plan de la santé des sols et des écosystèmes.

Ces perspectives devront aussi intégrer le besoin exprimé d'accroître la précision des cartes de sol en densifiant les observations et en faisant appel à la cartographie numérique, alors que le 250 000e se termine, pour passer à des cartes de résolution spatiale plus fine et assorties d'une estimation de leurs incertitudes (e.g., Lacoste *et al.*, 2014 ; Ellili Bargaoui *et al.*, 2019 ; Arrouays *et al.*, 2020 ; Voltz *et al.*, 2020 ; Loiseau *et al.*, 2021 ; Styc *et al.*, 2021). Ce besoin de passer à des résolutions spatiales plus fines est partagé par de nombreux pays (*e.g.* USA, Thompson *et al.*, 2020 ; Inde, Dharumarajan *et al.*, 2019).

4.3. Quelle articulation des données et productions nationales du GIS Sol aux objectifs européens et internationaux ?

De nombreuses initiatives internationales nécessiteront des méthodologies, des données et des cartes de propriétés des sols, d'indicateurs *ad-hoc* à l'échelle nationale, pour nourrir les initiatives aux échelles supra. Parmi ces initiatives, Figurent la création de l'observatoire des sols de l'Union européenne (EUSO), l'amplification de programmes de cartographies internationales face aux enjeux globaux, tels que le programme Global Soil Map (Arrouays *et al.*, 2018), ou les travaux réalisés dans le cadre de grandes conventions internationales sur le climat, la biodiversité, la désertification, le cadre européen de la nouvelle mission « un pacte des sols pour l'Europe » et du Green Deal (Commission européenne, 2020) ainsi qu'un nouveau texte juridique européen sur les sols attendu pour 2023 (Panagos et *al.*, 2022). La contribution du GIS Sol à ces initiatives est détaillée par ailleurs (Arrouays *et al.*, 2022). Le GIS Sol, actif dans ces initiatives, devra poursuivre cette dynamique, tout en valorisant bien la richesse particulière des méthodologies et données françaises.

4.4. Quelle animation des communautés d'utilisateurs et quels modes de dissémination des données pour leur meilleure utilisation ?

Les besoins exprimés dans le cadre de l'enquête en ligne ont mis en évidence le besoin d'animer des communautés d'acteurs, utilisatrices à divers titres des données du GIS Sol (partie 2). Parallèlement, il ressort que des structures existantes (RMT Sols et Territoires, Réseau national d'expertise scientifique et technique sur les sols -RNEST-, Association Française de l'Etude des Sols) dont les missions portent sur l'animation d'acteurs, ne semblent pas assez connues. Enfin, le Géoportail, qui héberge une information sur la nature des sols en France, est considéré comme un vecteur important de dissémination de l'information sur les sols, notamment dans une communauté d'acteurs non spécialistes des sols.

À partir de ces éléments, la proposition pourrait être de renforcer la place de la diffusion des données dans le Géoportail, en y portant à connaissance des travaux issus d'autres programmes du GIS Sol que la seule carte nationale des sols, et de travailler de manière plus étroite avec le RMT Sols et territoires, dont les travaux portent sur les niveaux d'organisation spatiale des territoires et de la parcelle, qu'ils soient mixtes, agricoles, forestiers ou urbains, et sur les impacts des modes de gestion des sols. Le besoin de communication, d'animation de réseaux d'acteurs autour de l'utilisation des données du GIS Sol a aussi été souligné et de véritables moyens dédiés à la communication, à la formation, à l'animation de réseaux d'acteurs pourraient être intégrés au GIS Sol, pour mieux diffuser les données et aider à leur utilisation. Le partage d'expériences d'utilisation des données, sur des cas concrets, à l'échelle locale, pourrait plus encore mettre en synergie des complémentarités de missions entre le GIS Sol, RNEST, le RMT Sols et Territoires, l'Afes, voire même AllEnvi[10], ou les infrastructures de recherche (ANAEE1[11], OZCAR4[12]…).

La dimension informatique d'une amplification de la dissémination d'information et de la communication, dans une visée d'open data, est importante et suppose d'associer des moyens pour favoriser l'utilisation des données, pour les intégrer dans des modèles, permettre le calcul d'indicateurs, traiter des données hétérogènes provenant des sciences et recherches participatives… Des compétences technologiques et d'ingénierie (interopérabilité, données FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability and Reusability, etc.)), une formation des acteurs en matière de pédométrie, de télédétection des sols et d'archivage de la donnée doivent être associées. On observe par ailleurs une montée en puissance d'autres plateformes (data.gouv.fr, recherche.data.gouv.fr) qui modifient progressivement le paysage numérique et auxquelles il faudra s'articuler. L'interopérabilité doit être pensée comme un moyen d'améliorer la visibilité des données sur les sols par le plus grand nombre de plateformes.

4.5. Quel modèle économique et juridique pour un système d'information sur les sols ?

L'offre du GIS Sol est permise par des fonds publics venant des ministères, des agences, des organismes de recherche, des régions et de l'Europe, notamment pour les partenaires du GIS Sol (Fond Feader). La plupart de ces financements sont contraints, limités dans le temps, donnant au GIS Sol une fragilité certaine (Arrouays *et al.*, 2022). La recherche d'un modèle économique stable est une nécessité pour une mission aussi importante que l'inventaire et la surveillance des sols, l'objectif minimal étant une pérennisation et une stabilisation des moyens sur le périmètre actuel du GIS Sol et de ses principaux programmes.

Le statut juridique du GIS, l'intégration de l'inventaire et la surveillance dans la loi ou dans des missions d'intérêt général, pourraient consolider les moyens du GIS Sol. On peut espérer que la récente stratégie européenne sur les sols, ses déclinaisons réglementaires européennes par une directive actuellement en discussion, puis nationales, puissent permettre d'avancer sur une consolidation voire une amplification de moyens.

La diversification et l'élargissement des sources de financements sembleraient parfaitement justifiés pour un grand nombre d'usages des données du GIS Sol, mais ceci suppose de créer ou de renforcer des liens et des partenariats avec des acteurs qui ne sont pas membres du GIS Sol, tels que par exemple, les agences de l'eau, les collectivités territoriales, voire des acteurs privés, comme cela se met en place dans certaines opérations, par exemple autour du label bas carbone.

5. CONCLUSION

Face aux attentes de la société et des politiques publiques relatives à la gestion et la protection des sols, il est attendu que le GIS Sol réponde de manière à la fois ambitieuse et réaliste : par une diffusion plus forte de ses résultats ; par de nouvelles acquisitions de données ; par une collaboration plus étroite avec les différents acteurs de la gestion des sols permettant l'appropriation, l'utilisation et la valorisation des données par le plus grand nombre. Le paradoxe est cependant flagrant : si les sols sont au centre de plusieurs objectifs du développement durable, s'ils sont aujourd'hui reconnus comme indispensables au bon fonctionnement des agroécosystèmes et au maintien de services écosystémiques multiples, le modèle juridique et économique de leur inventaire

10 ALLENVI : Alliance nationale de recherche pour l'environnement
11 ANAEE : https://www.anaee-france.fr/
12 OZCAR : https://www.ozcar-ri.org/fr/ozcar-observatoires-de-la-zone-critique-applications-et-recherche

et de leur surveillance n'est pas à même d'opérer toutes ces ambitions, et pose la question de la volonté politique et des modalités d'arbitrage dans ce domaine et relativement aux autres. Des outils de démonstration et de communication, facilement accessibles et compréhensibles, peuvent sans doute être plus encore développés, pour faire la preuve qu'une utilisation raisonnée des données sur les sols est aujourd'hui devenue possible et utile, démontrant qu'un développement ambitieux de programmes d'inventaire et de surveillance des sols est bénéfique à l'ensemble de la société.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Guy Landmann, directeur adjoint du GIP ECOFOR, et Christian Walter, professeur à l'Institut Agro, pour leur contribution à l'amélioration de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

Adhikari K., Hartemink A.E. (2016). Linking soils to ecosystem services — A global review. Geoderma, 262, 101–111.

Acocella V. (2015). Grand challenges in earth science: research toward a sustainable environment. Front. Earth Sci. 3 https://doi.org/10.3389/feart.2015.00068.

Amundson R. (2021). Factors of soil formation in the 21st century. Geoderma 391, 114960. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114960.

Arrouays D., McBratney A.B., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A.C., Morgan C., Roudier P., Poggio L., Mulder V.-L. (2020). Impressions of digital soil maps: the good, the not so good, and making them ever better. Geoderma Regional. 20, e00255.

Arrouays D., Poggio L., Mulder V.-L., Salazar Guerrero O. (2021). Digital Soil Mapping and *GlobalSoilMap*– Scientific advances and the operational use of Digital Soil Mapping to address global environmental challenges. Geoderma Regional, 26, e00414.

Arrouays D., Richer-de-Forges A.C., McBratney A. B., Hartemink A. E., Minasny B., Savin I., Grundy M., Leenaars J. G. B., Poggio L., Roudier P., Libohova Z., McKenzie N. J., van den Bosch H., B. Kempen, Mulder V. L., Lacoste M., Chen S., Saby N., Martin M., Roman Dobarco M., Cousin I., Loiseau T., Lehmann S., Caubet M., Lemercier B., Walter C., Vaudour E., Gomez C., Martelet G., Krasilnikov P., Lagacherie P. (2018). The globalsoilmap project; past, present, future, and national examples from France. Bulletin of Dokutchaev Soil Science Institute, 95, 22 p. DOI : 10.19047/0136-1694-2018-95-3-23.

Arrouays D., Stengel P., Feix I., Lesaffre B., Morard V., Bardy M., Bispo A., Laroche B., Caquet T., Juille F., Rabut M., Soussana J.-F., Voltz M., Gascuel-Odoux C. (2022). Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années. Étude et Gestion des Sols. Vol .29, pp. 365-379.

Bispo A., Guellier C., Martin E., Sapijanskas J., Souvelet, H., Chenu C. (eds) (2016). Les sols. Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable. Collection Savoir-faire. Editions Quae, France. 304 p.

Barthès B.G., Chotte J. (2021). Infrared spectroscopy approaches support soil organic carbon estimations to evaluate land degradation. Land Degradation & Development 32, 310–322. https://doi.org/10.1002/ldr.3718

Bouma J. (2014). Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 177(2), 111–120.

Castaldi F., Chabrillat S., Don A., van Wesemael B. (2019). Soil Organic Carbon Mapping Using LUCAS Topsoil Database and Sentinel-2 Data: An Approach to Reduce Soil Moisture and Crop Residue Effects. Remote Sensing 11, 2121. https://doi.org/10.3390/rs11182121

CEE (2006). Proposition de DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE. COM(2006). Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 31 p. Version française consultée le 05/06/2022. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006PC0232&from=it.

Commission européenne. (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, The European Council, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, vol. 2019. The European Green Deal. COM, 640 final. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52 019DC0640.

Dharumarajan S., Hedge R., Janania S., Singh S.K. (2019). The need for digital soil mapping in India. Geoderma Regional, 16, e00204.

Eglin T., Cousin I., Walter C. (2021). Contribution aux réflexions sur les concepts de fonctions des sols et de services écosystémiques, et leur évaluation. Étude et Gestion des Sols 28, 143-146.

Ellili Bargaoui Y., Walter C., Michot, D., Saby N.P.A., Vincent S., Lemercier B. (2019). Validation of digital maps derived from spatial disaggregation of legacy soil maps. Geoderma, 356, 113907.

Fossey M., Angers D., Bustany C., Cudennec C., Durand P., Gascuel-Odoux C., Jaffrezic A., Pérès G., Besse C., Walter C. (2020). Framework to Consider Soil Ecosystem Services in Territorial Planning. Environ. Sci., https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00028

Froger C., Saby N.P.A., Claudy C., Boulonne L., Caria G., Freulon X., Fouquet C., Roussel H., Marot F., Bispo A. (2021). Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. SOIL, 7, 161–178. https://doi.org/10.5194/soil-7-161-2021

Gomez C., Lagacherie P., Coulouma G. (2012). Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral Vis–NIR data. Geoderma 189–190, 176–185. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.023

Gomez C., Vaudour E., Féret J.B., De Boissieu F., Dharumarajan S. (2022). Topsoil clay content mapping from Sentinel-2 data in croplands: influence of atmospheric correction methods across a season time series. Geoderma, accepté pour publication.

Hu B., Bourennane H., Arrouays D., Denoroy P., Lemercier B., Saby N.P.A. (2021). Developing global pedotransfer functions to harmonize extractable soil phosphorus measured with different methods: A case study across the mainland of France. Geoderma, 381, 114645.

Humboldt-Dachroeden S., Rubin, O., Sylvester Frid-Nielsen S. (2020). The state of One Health research across disciplines and sectors – a bibliometric analysis. One health, 10, 100146.

Keesstra S.D., Bouma J., Wallinga J., Tittonell P., Smith P., Cerdà A., Montanarella L., Quinton J.N., Pachepsky Y., van der Putten W.H., Bardgett R.D. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. SOIL, 2(2), 111–128.

Kidd D., Searle R., Grundy M., McBratney A.B., Robinson N., O'Brien L., Zund D., Arrouays D., Thomas M., Padarian J., Jones E., McLean Bennett J., Minasny B., Holmes K., Malone B., Liddicoat C., Meier E.A., Stockmann U., Wilson P., Wilford J., Payne J., Ringrose-Voase A., Slater B., Odgers N., Gray J., Van Gool D., Andrews K., Harms B., Stower L., Triantafillis J. (2020). Operationalising Digital Soil Mapping - Lessons from Australia. Geoderma Regional, 23, e00335. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00335.

Lacarce E., Le Bas C., Cousin J.-L., Pesty B., Toutain B., Houston Durrant T., Montanarella, L. (2009). Data management for monitoring forest soils in Europe for the Biosoil project. Soil Use and management, 25, 57-65.

Lacoste M., Minasny B., McBratney A.B., Michot D., Viaud V., Walter C. (2014). High resolution 3D mapping of soil organic carbon in a heterogeneous agricultural landscape. Geoderma, 213, 296-311.

Le Bas C., Antoni V., Bispo A., Brunet J.F.N., Bougon N., Joassard I., Laville P., Renault P., Sauter J. (2022). 20 ans du GIS Sol. Enquête utilisateur sur les besoins de données sur les sols. Restitution des résultats. GIS Sol, 45p.

Loiseau T., Richer-de-Forges A.C., Martelet G., Bialkowki A., Nehlig P., Arrouays D. (2020). Could airborne gamma spectrometric data replace lithological maps as co-variates for digital soil mapping of topsoil particle-size distribution? A case study in Western France. Geoderma Regional. 22, e00295.

Loiseau T, Arrouays D., Richer-de-Forges A.C., Lagacherie P., Ducommun C., Minasny B. (2021). Density of soil observations in digital soil mapping: A study in the Mayenne region, France. Geoderma Regional, 24, e00358.

McBratney A.B., Field D.J., Koch A. (2014). The dimensions of soil security. Geoderma, 213, 203-213.

Messant A., Lehmann S., Moulin J., Lagacherie P., Jalabert S., Noraz A., Lemercier B., Chafchafi A., Mure J.-P., Laroche B., Sauter J. (2021). Diffusion des Référentiels Régionaux Pédologiques sous la forme d'une carte des sols dominants (France métropolitaine hors-Corse) accessible sur le Géoportail. Etude et Gestion des Sols, 28 (1), 57-70.

Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N.J., 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., Mendonça-Santos MdL., Taboada M., Espinosa-Victoria D., AlShankiti A., AlaviPanah S.K., Elsheikh Z.A.E., Hempel L., Camps Arbestain M., Nachtergaele F., Vargas R. (2016). World's soils are under threat. SOIL, 2, 79-82.

Montanarella L., Vargas R. (2012). Global governance of soil resources as a necessary condition for sustainable development. Curr. Opin. Environ. Sustain., 559-564.

Ortiz García S., Saynes Santillan V., Bunge-Vivier V., Marisol Anglés-Hernández M., Eduardo Pérez M., Prado B. (2022). Soil governance and sustainable agriculture in Mexico. Soil Security, 7, 100059.

Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. (2012). European Soil Data Centre: response to European policy support and public data requirements. Land Use Policy, 29, 329– 338.

Panagos P., Montanarella L., Barbero M., Aguglia L., Jones A. (2022). Soil priorities in the European Union. Geoderma Regional, 29, e00510.

Raia P.S., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. Environment International, 125, 365-385.

Ranjard L., Sauter J., Auclerc A., Chauvin C., Cluzeau D., Mereau D., Philippe Loiseau-Dubosc P., Lemercier B., d'Oiron E., Raous S., Roturier C., Rovillé M., Serin L., Gascuel-Odoux C. (2022). Sciences et recherches participatives sur les sols en France : bilan et perspectives. Étude et Gestion des Sols, 29, 381-393.

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.

Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Bardy M., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemercier B., Sauter J., Voltz M. (2019). Mapping of Soils and Land-Related Environmental attributes in France: analysis of end-users' needs. Sustainability, 11, 2940; doi:10.3390/su11102940.

Rossiter D., Liu J., Calisle S, Zhu A.-X. (2015). Can citizen science assist digital soil mapping? Geoderma, 259-260, 71-80.

Styc Q., Gontard F., Lagacherie P. (2021). Harvesting spatially dense legacy soil datasets for digital soil mapping of available water capacity in Southern France. Geoderma Regional, 24, e00353.

Thompson J.A., Kienast-Brown. S., D'Avello T., Philippe J., ColbyBrungard C. (2020). Soils2026 and digital soil mapping – A foundation for the future of soils information in the United States. Geoderma Regional, 22, e00294.

Urbina-Salazar D., Vaudour E., Baghdadi N., Ceschia E., Richer-de-Forges A.C., Lehmann S., Arrouays D. (2021). Using Sentinel-2 Images for Soil Organic Carbon Content Mapping in Croplands of Southwestern France. The Usefulness of Sentinel-1/2 Derived Moisture Maps and Mismatches between Sentinel Images and Sampling Dates. Remote Sensing 13, 5115. https://doi.org/10.3390/rs13245115

Vaudour E., Girard M.C. (2010). Pédologie. Chap. 23. *In* : Girard MC & Girard CM, Traitement des données de télédétection, Dunod, Paris.

Vaudour E., Gomez V., Fouad Y., Lagacherie P. (2019a). Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperate and Mediterranean agroecosystems. Remote Sensing of Environment, 223, 21-33.

Vaudour E., Gomez C., Loiseau T., Baghdadi N., Loubet B., Arrouays D., Ali L., Lagacherie P. (2019b). Impact of acquisition date on the prediction performance of topsoil organic carbon content from Sentinel-2 for cropland agroecosystems. Remote Sensing, 11(18), 2143. https://doi.org/10.3390/rs11182143.

Vaudour E., Gholizadeh A., Castaldi F., Saberioon M., Borůvka L., Urbina-Salazar D., Fouad Y., Arrouays D., Richer-de-Forges A.C., Biney J., Wetterlind J., Van Wesemael B. (2022). Satellite imagery to map topsoil organic carbon content over cultivated areas: an overview. Remote Sensing, 14, 2917. https://doi.org/10.3390/rs14122917.

Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemercier B., Richer-de-Forges A.C., Sauter J., Schnebelen N. (2020). Possible futures of soil mapping in France. Geoderma Regional, 23, e00334.