HAL open science

Le rayonnement et les actions significatives du GIS Sol à l'international

Dominique Arrouays, Antonio Bispo, Marion Bardy, Bertrand Laroche, Patricia Laville, Christine Le Bas, Nicolas P. A. Saby, Céline Ratié, Manuel P Martin, Claudy Jolivet, et al.

To cite this version:

Dominique Arrouays, Antonio Bispo, Marion Bardy, Bertrand Laroche, Patricia Laville, et al.. Le rayonnement et les actions significatives du GIS Sol à l'international. Étude et Gestion des Sols, 2023, 30, p. 83-96. hal-03852422

HAL Id: hal-03852422

https://hal.inrae.fr/hal-03852422v1

Submitted on 15 Nov 2022

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Numéro spécial
20 ans du GIS Sol

Le rayonnement et les actions significatives du GIS Sol à l'international

D. Arrouays(1*), A. Bispo(1*), M. Bardy(2), B. Laroche(1), P. Laville(3), C. Le Bas(1), N.P.A. Saby(1), C. Ratié(1), M.P. Martin(1), C. Jolivet(1), A.C. Richer-de-Forges(1), V. Antoni(4), I. Joassard(4), I. Feix(5), M. Brossard(6), P. Lagacherie(7) et J.-F. Soussana(8)

1) INRAE, InfoSol, 45075, Orléans, France
2) Ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire, Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche, 75 007 Paris, France, ancienne directrice de l'US InfoSol
3) Ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire, Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, 75007 Paris France,
4) Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, Commissariat Général au Développement Durable, Service des données et des études statistiques, 5, route d'Olivet 45061 ORLEANS CEDEX 2, France
5) Ademe, experte nationale « sol », Direction Bioéconomie et Énergies Renouvelables, 49004, Angers, France
6) IRD, UMR Eco&Sols - 34000 Montpellier, France
7) INRAE, UMR LISAH - 34000 Montpellier France
8) INRAE, Vice-Président international, ancien Directeur Scientifique Environnement, 75338 Paris Cedex 07, France

* Auteurs correspondants : dominique.arrouays@inrae.fr ; antonio.bispo@inrae.fr

RÉSUMÉ

Les sols sont au carrefour d'enjeux planétaires majeurs. L'importance d'une gestion raisonnée et durable des sols est ainsi de plus en plus reconnue au niveau mondial. Il en est logiquement de même en ce qui concerne la nécessité de constituer des systèmes d'information harmonisés, locaux, nationaux, continentaux et mondiaux sur les sols et leurs propriétés. Dans cet article, nous décrivons les évolutions internationales pour lesquelles nous considérons que le GIS Sol a joué un rôle important, tant pour le développement de produits de démonstration, qu'en matière de collaboration, d'initiation, de formation, ou de coordination d'actions internationales. Dans cet article, nous illustrons tout d'abord comment les actions du GIS Sol et de ses partenaires ont contribué au développement de systèmes d'information et au soutien à des infrastructures étrangères, européennes ou mondiales. Nous montrons ensuite ses actions les plus marquantes en matière de développement et de structuration de la recherche et du renforcement du leadership scientifique de la France en bases de données, cartographie et

Comment citer cet article :
Arrouays D., Bispo A., Bardy M., Laroche B., Laville P., Le Bas C., Saby N. P.A., Ratié C., Martin M. P., Jolivet C., Richer-de-Forges A. C., Antoni V., Joassard I., Feix I., Brossard M., Lagacherie P. et Soussana J.-F., 2023 - Le rayonnement et les actions significatives du GIS Sol à l'international - Étude et Gestion des Sols, 30, 83-96

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/

surveillance des sols. Enfin, nous illustrons l'implication du GIS Sol au niveau des politiques et des rapportages européens et mondiaux sur les sols et des actions de normalisation internationales.
Ces illustrations indiquent clairement que ses programmes pionniers, originaux, inspirants et complémentaires, ont pesé fortement sur le rayonnement du GIS Sol à l'international.

Mots-clés
Sols, GIS Sol, France, rayonnement international, rapportage

SUMMARY
THE INTERNATIONAL INFLUENCE AND SIGNIFICANT ACTIONS OF THE FRENCH GROUP OF SCIENTIFIC INTEREST ON SOIL (GIS SOL)

Soils are at the crossroads of major planetary issues. The importance of rational and sustainable soil management is thus increasingly recognized worldwide. It is logically the same with regard to the need to establish harmonized local, national, continental and global information systems on soils and their properties. In this article, we describe the international developments for which we consider that the GIS Sol has played an important role for the development of demonstration products, and in terms of collaboration, initiation, training, or for the coordination of international actions.
In this article, we first illustrate how the actions of GIS Sol and its partners have contributed to the development of information systems and support for foreign, European or global infrastructures. We then show its most significant actions in terms of developing and structuring research and strengthening France's scientific leadership in databases, mapping and soil monitoring. Finally, we illustrate the involvement of GIS Sol in European and global policies and reporting on soils and international standardization actions.
These illustrations clearly indicate that its pioneering, original, inspiring and complementary programs, have had a strong impact on the influence of the GIS Sol internationally.

Key-words
Soils, GIS Sol, France, international influence, reporting.

RESUMEN
LA PROYECCIÓN Y LAS ACCIONES SIGNIFICATIVAS DEL GIS SOL A NIVEL INTERNACIONAL

Los suelos se encuentran en una encrucijada de importantes desafíos mundiales. En consecuencia, se reconoce cada vez más la importancia de una ordenación racional y sostenible de los suelos. Lo mismo se aplica lógicamente a la necesidad de crear sistemas de información armonizados, locales, nacionales, continentales y mundiales sobre los suelos y sus propiedades. En este artículo, describimos las evoluciones internacionales en las que consideramos que el GIS Sol desempeñó un papel importante, tanto en el desarrollo de productos de demostración, como en materia de colaboración, iniciación, formación, o de coordinación de acciones internacionales.
En este artículo, ilustramos en primer lugar cómo las acciones del GIS Sol y de sus asociados han contribuido al desarrollo de sistemas de información y al apoyo a infraestructuras extranjeras, euro-peas o mundiales. Luego mostramos sus acciones más destacadas en materia de desarrollo y estructuración de la investigación y del fortalecimiento del liderazgo científico de Francia en bases de datos, cartografía y vigilancia de los suelos. Por último, ilustramos la implicación del GIS Sol en las políticas e comunicaciones europeas y mundiales sobre los suelos y en las acciones de normalización internacionales.
Estas ilustraciones indican claramente que sus programas pioneros, originales, inspiradores y com-plementarios han influido fuertemente en la proyección internacional del GIS Sol.

Palabras clave
Suelos, GIS Sol, Francia, proyección internacional, comunicaciones.

INTRODUCTION

Les sols sont au carrefour d'enjeux planétaires majeurs tels que la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau, la production de fibres et de matériaux, l'énergie durable, et la protection de la biodiversité et de la santé humaine. L'importance d'une gestion raisonnée et durable des sols est ainsi de plus en plus reconnue au niveau mondial (Amundson *et al.*, 2015 ; Lal *et al.*, 2021 ; McBratney *et al.*, 2014 ; Montanarella, 2015 ; Keesstraa *et al.*, 2016 ; Montanarella *et al.*, 2016 ; Bouma, 2014 ; 2020). Il en est logiquement de même de la nécessité de constituer des systèmes d'information locaux, nationaux, continentaux et mondiaux sur les sols et leurs propriétés (ITPS-FAO, 2015 ; Arrouays *et al.*, 2017a, 2021a, 2021b ; Arrouays et Dawson, 2022). Ces différentes échelles sont nécessaires (Sanchez *et al.*, 2009 ; Vitousek *et al.*, 2009 ; Arrouays *et al.*, 2014 ; Orgiazzi *et al.*, 2018 ; Maréchal *et al.*, 2021 ; Giller, 2012 ; Guevara *et al.*, 2018 ; Lemercier *et al.*, 2022 ; Richer-de-Forges *et al.*, 2022) car selon les territoires et les étendues considérées, les facteurs de contrôle de la distribution des propriétés des sols (*e.g.* Caubet *et al.*, 2019 ; Arrouays *et al.*, 2020a ; Chen *et al.*, 2020 ; Lemercier *et al.*, 2022 ; Richer-de-Forges *et al.*, 2022), les menaces qui pèsent sur eux (Citeau *et al.*, 2008 ; Montanarella *et al.*, 2015) et les acteurs susceptibles d'avoir une action efficace sur leur gestion (Bispo *et al.*, 2016 ; Richer-de-Forges *et al.*, 2019a, 2019b ; Arrouays *et al.*, 2020b, 2021a ; Voltz *et al.*, 2020), peuvent différer.

- On assiste à une montée en puissance progressive de la thématique sol dans les programmes régionaux, nationaux, européens et internationaux (*e.g.* Commission Européenne, 2006 ; Hartemink et McBratney, 2008 ; ITPS-FAO, 2015 ; Maréchal *et al.*, 2022 ; Loi Climat et résilience, 2021 ; Veerman *et al.*, 2022). En témoigne également la nouvelle stratégie de l'Union Européenne pour les sols à l'horizon 2030, (European Commission, 2021), https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699.

Dans cet article, nous illustrons et discutons les évolutions internationales dans lesquelles le GIS Sol a joué un rôle important, tant pour le développement de produits de démonstration, qu'en matière de collaboration, d'initiation, de formation, ou de coordinations d'actions internationales.

DÉVELOPPEMENT DE SYSTÈMES D'INFORMATION ET SOUTIEN À DES INFRASTRUCTURES DE DONNÉES DE SURVEILLANCE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS

Suite à un article de synthèse faisant le point sur l'état des bases de données sur les sols depuis des échelles nationales jusqu'aux échelles globales et réunissant 89 co-auteurs (Arrouays *et al.*, 2017b), le constat a été fait d'une énorme disparité de la densité géographique des bases de données sur les sols dans le monde. Beaucoup de données historiques étaient perdues ou en voie de disparition, car elles étaient contenues dans des rapports ou des notices de cartes dont les données n'avaient pas été sauvegardées. Ces données anciennes sont essentielles pour deux raisons : certaines sont relativement pérennes sur les pas de temps considérés et peuvent donc contribuer très fortement à l'amélioration de la précision de cartes « statiques », d'autres sont au contraire fortement évolutives et peuvent apporter des informations précieuses sur des changements spatio-temporels. Cet ensemble de données potentiellement perdues a été estimé à une valeur de plus de 40 milliards d'euros. L'effort de la France dans le cadre du programme IGCS du GIS Sol, pour réaliser un sauvetage systématique de ses données anciennes, a été particulièrement mis en avant, de même que celui de l'ISRIC à l'échelle internationale, bénéficiant aussi des anciens et nombreux travaux de l'IRD (ex-ORSTOM, et membre du GIS Sol) dans les pays du Sud (voir, par exemple, Dewitte *et al.*, 2013 ; Grinand *et al.*, 2009 ; Leennaars *et al.*, 2014 ; Ramifehiarivo *et al.*, 2017). Ces travaux de sauvetage de données anciennes ont été récompensés par le deuxième prix de l'International « Data Rescue Award in the Geosciences » co-délivré par Elsevier© et l'IEDA (Interdisciplinarity Earth Data Alliance). Aujourd'hui, ce sauvetage est considéré comme une priorité par de très nombreux pays et continents (*e.g.* Brésil, Argentine, Chili, Colombie, Russie, Inde, Iran, Cameroun, Afrique du Sud, Mexique, Amérique du Sud (*e.g.* Dharumarajan *et al.*, 2019 ; Arrouays *et al.*, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b ; Rasaei *et al.*, 2020 ; Samuel-Rosa *et al.*, 2020 ; Arrouays et Dawson, 2022)).

À l'échelle européenne, le GIS Sol, à travers la participation INRAE et de l'Ademe, a coordonné une action dans le cadre du programme européen ENVASSO (2006-2008), mettant en évidence la disparité des systèmes d'information et des réseaux de surveillance des sols nationaux en Europe (Morvan *et al.*, 2008 ; Saby *et al.*, 2008 ; Arrouays *et al.*, 2008), puis pris le leadership (INRA-IFN) de la constitution d'un produit de démonstration d'une base de donnée européenne des sols forestiers dans le cadre du projet BioSoil (Lacarce *et al.*, 2009). Ces deux projets ont conduit l'Union Européenne à lancer le programme européen harmonisé LUCAS-Soil (Orgiazzi *et al.*, 2018). Les travaux conduits dans le cadre du programme RMQS

du GIS Sol, soutenus en particulier par l'Ademe, ont également permis d'initier et d'impulser des travaux sur la biodiversité des sols. Ils ont montré l'importance de certains indicateurs comme la biodiversité des communautés de lombriciens (Pérès *et al.*, 2011) ou bactériennes (*e.g.* Ranjard *et al.*, 2013 ; Terrat *et al.*, 2017 ; Karimi *et al.*, 2018). Un autre exemple, initialement soutenu par l'IFEN avant la création du GIS Sol, et poursuivi après cette dernière, a permis d'élaborer une méthodologie d'estimation de l'aléa d'érosion des sols pour la France (Le Bissonnais *et al.*, 1998, 2002), déclinée ensuite à l'échelle européenne (Le Bissonnais *et al.*, 2005) et au-delà (Hessel *et al.*, 2014).

DÉVELOPPEMENT ET STRUCTURATION DE LA RECHERCHE, ARTICULATION DES BASES DE DONNÉES NATIONALES, EUROPÉENNES ET MONDIALES

Déjà très présente dans la recherche sur les sols au niveau international, la France, en particulier grâce aux actions du GIS Sol, a développé fortement les recherches en matière de cartographie par modélisation statistique et de surveillance des sols. Elle a ainsi organisé la première conférence mondiale sur la cartographie numérique des sols en 2004 (Lagacherie *et al.*, 2007). Elle a figuré parmi les initiateurs du programme mondial GlobalSoilMap (Sanchez *et al.*, 2009), puis en a pris le leadership (Arrouays *et al.*, 2013 ; 2014a ; 2014b ; 2018b). Les programmes du GIS Sol sont à l'origine de 3 « best papers in pedometrics » et du positionnement français de deux présidences successives de groupes de travail (Soil Monitoring, puis GlobalSoilMap, (D. Arrouays)) et d'une co-présidence de la Commission Pedometrics (N. Saby) de l'Union Internationale des Sciences du Sol (UISS). La deuxième conférence internationale sur le thème « Soil Security » a également été organisée en France en 2016 (Richer-de-Forges *et al.*, 2019a) où les travaux et l'organisation du GIS Sol y ont été particulièrement mis en valeur (Antoni *et al.*, 2019).

Des acteurs français du GIS Sol ont été aussi co-organisateurs de la 2e conférence internationale « GlobalSoilMap » de Moscou en 2017 (Arrouays *et al.*, 2018b), et de la conférence internationale de Santiago (Chili) en 2019, réunissant les working groups « Digital Soil mapping » et « GlobalSoilMap » de l'UISS et ayant donné lieu à un numéro spécial de la revue Geoderma Regional réunissant des articles en provenance de tous les continents et de 18 pays (Arrouays *et al.*, 2021b).

Sans en faire une liste exhaustive, les données acquises par le GIS Sol, comme les échantillons collectés au conservatoire d'échantillons de sols (Ratié *et al.*, 2010), ont permis l'établissement de très nombreuses collaborations de recherche et la production de très nombreux articles internationaux. Ceci a résulté en une visibilité accrue des équipes nationales en science du sol, une présence française renforcée dans les comités éditoriaux de revues internationales, et dans l'édition de plusieurs numéros spéciaux dans ces revues.

En ce qui concerne la structuration de la recherche, le leadership français porté par les programmes du GIS Sol, a également permis de mettre en place un Consortium de recherche financé par « The Loire Valley STUDIUM Institute for Advanced Research Studies », qui organisera la deuxième conférence internationale réunissant les working groups « Digital Soil Mapping » et « GlobalSoilMap » de l'UISS, à Orléans, en 2023 (https://www.lestudium-ias.com/event/soil-mapping-sustainable-future).

Au plan européen, des acteurs du GIS Sol sont en position de leadership dans le cadre de l'action 6 « Supporting harmonised soil information and reporting » du vaste « European Joint Programme (EJP) SOIL », qui rassemble 45 instituts de 24 pays différents. Des propositions pour des méthodes d'harmonisation sont en cours d'élaboration (e.g., Bispo *et al.,* 2021 ; Bispo *et al.*, 2022). Il s'agit en particulier de rendre comparables les résultats des réseaux nationaux de surveillance des sols entre eux, mais également d'élaborer des propositions pour rendre compatibles les programmes nationaux avec des programmes d'envergure européenne comme le « European Soil Data centre » (ESDAC, Panagos *et al.*, 2012) et le vaste programme européen d'acquisition LUCAS-Soil (Orgiazzi *et al.*, 2018). Un travail est actuellement en cours visant à promouvoir l'interopérabilité des données au sein des instituts européens (Van Egmond F., Fantappié M., (eds), 2021). Cette harmonisation et ces liens renforcés entre les niveaux nationaux et européens doivent permettre la mise en place du futur observatoire européen de la qualité des sols (ou EU Soil Observatory, Maréchal *et al.*, 2022) au sein duquel les travaux du GIS Sol, souvent montrés en exemple, occupent une place très particulière (Bispo et Le Bas, 2021).

Un autre exemple marquant est l'implication dans le projet de recherche européen H2020 LANDMARK (Land Management Assessment Research Knowledge base) de gestion durable des terres et des sols (SFS-04-2014 - Soil quality and function - http://landmark2020.eu) réunissant un consortium de 22 partenaires. De par son expertise française en matière de gestion et de structuration des données sols, INRAE s'est vu confier la responsabilité d'un programme de travail sur la gestion des données nécessaires à l'évaluation des fonctions écosystémiques rendues par les sols au niveau européen (voir, par exemple, Sandén *et al.*, 2019 ; van Leeuwen *et al.,* 2019). Forts de cette reconnaissance, c'est également INRAE qui gère les données de biodiversité des sols du programme Européen EJP SOIL-MINOTAUR (https://ejpsoil.eu/soil-research/minotaur) et du futur projet Européen BENCHMARKS (démarrage prévu en janvier 2023).

Le réseau européen ICOS (International Carbon Observation

System, Franz *et al.,* 2018), dont l'objectif est de produire des observations standardisées, de haute précision et à long terme au service de la recherche sur le changement climatique, a également bénéficié de l'expertise et des infrastructures INRAE soutenues par le GIS Sol. L'évaluation et le suivi à long terme des stocks de carbone des sols de l'ensemble des stations du réseau « écosystèmes » d'ICOS est coordonné par INRAE, à travers l'élaboration de la stratégie d'échantillonnage, la rédaction d'un protocole d'échantillonnage et d'analyse (Loustau *et al*., 2017 ; Arrouays *et al*., 2018a ; Loubet *et al*., 2021), l'administration et la gestion des données, le développement de méthodes statistiques pour le calcul des stocks de carbone (Saby *et al*., 2022), et la conservation des échantillons de sols par le Conservatoire européen des é*chantillons de sols (Ratié et al., 2010).*

En ce qui concerne le potentiel de stockage de carbone dans les sols, le GIS Sol a contribué au projet de recherche et d'innovation H2020 de l'Union Européenne CIRCASA (Coordination of International Research Cooperation on Soil Carbon Sequestration in Agriculture) coordonné par la France (https://www.circasa-project.eu/), (voir, par exemple, Martin *et al*., 2021). Cette implication se poursuit avec le programme européen ORCASA (Coordination of International Research Cooperation on soil CArbon Sequestration in Agriculture), également coordonné par INRAE et qui vient d'être lancé afin de prendre la suite de CIRCASA. INRAE est également fortement impliqué dans le programme récent de l'EJP Soil CarboSeq qui vise à estimer le potentiel atteignable de séquestration de carbone dans les sols (https://ejpsoil.eu/soil-research/carboseq) en prenant en compte les contraintes techniques et socio-économiques.

Les données du GIS Sol sont en partie diffusées par INRAE et bénéficient ainsi des avancées technologiques et organisationnelles mises en place par cet Institut dans le cadre de sa politique de l'Open Science (portail de données ouvertes, infrastructure spatiale). Ces outils sont eux-mêmes connectés ou en cours de connexion avec des outils internationaux comme le géoportail Inspire, l'EOSC (European Open Science Cloud) ou OpenAIRE. Il s'agit ici principalement d'ouvrir les données au-delà du monde strict de la recherche, en suivant les prescriptions « FAIR » (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable ; eg. European Commission 2016 ; Dunning *et al*., 2017). Concernant les sols, ceci pose des questions juridiques spécifiques concernant la protection et la diffusion des données, qui sont détaillées par Sigal-Guille *et al.* (2023).

Les travaux menés depuis quelques années sur l'interopérabilité des données du GIS Sol amènent celui-ci à travailler sur les questions d'ontologie sur les sols (participation de C. Le Bas au groupe ESIP (Earth science information partners) soil ontology and informatics, travaux dans le cadre de l'EJP SOIL).

IMPLICATIONS DU GIS SOL DANS LES DÉCLINAISONS OPÉRATIONNELLES DES POLITIQUES PUBLIQUES ET LES ACTIONS NORMATIVES EUROPÉENNES ET INTERNATIONALES

Le modèle d'organisation du GIS Sol et de ses programmes, a conduit à de très nombreuses demandes de visites, interventions et/ou de formations de la part de pays étrangers ou d'organisation internationales. Il en est de même en ce qui concerne des demandes d'expertise ou des présentations invitées *(Tableau 1).*

Au plan des politiques européennes, le GIS Sol a bénéficié d'une longue collaboration préexistante avec le centre commun de recherche de la Commission Européenne (JRC) situé à Ispra (Italie), en particulier pour la constitution et l'harmonisation de bases de données géographiques (Jamagne *et al.,* 1995 ; ESBN, 2005b ; Daroussin *et al*., 2006), l'utilisation des données sols pour la prévision des rendements par modélisation à l'échelle européenne (Baruth *et al*., 2006), et la participation aux travaux du réseau du Bureau Européen des Sols (*e.g.* ESBN, 2005a ; Eckelmann *et al*., 2006). Dominique King (INRAE) fut l'un des pionniers qui contribua à mettre en place ce réseau du Bureau Européen des Sols dont il fut le premier président. Le GIS Sol a été fortement impliqué dans les groupes de travail et les rapports commandités par la DG Environnement de l'Union Européenne, en préparation de sa proposition de directive européenne sur les sols de 2006 (van Camp *et al*., 2004). Ces groupes préparatoires ont rendu des rapports très complets impliquant la participation active des partenaires institutionnels du GIS Sol dont nous listons ici les thèmes et la participation des partenaires : érosion (INRAE : une personne, BRGM : une personne) ; matière organique et biodiversité (INRAE : deux personnes, Ministère en charge de l'Environnement : une personne, Ademe : une personne) ; contamination (Ministère en charge de l'Environnement : une personne, Ademe : trois personnes) ; monitoring (INRAE : une personne) ; recherche, imperméabilisation et sujets transversaux (INRAE : trois personnes, Ministère en charge de l'Environnement : une personne, BRGM : une personne).

Le GIS Sol est actuellement fortement sollicité pour la relecture de documents préparatoires de la nouvelle politique européenne sur les sols et l'animation de groupes de travail européens. Ainsi, deux personnes INRAE participent en tant qu'experts pour siéger dans la « Commission Expert Group on the implementation of the EU Soil Strategy for 2030 ». Ce groupe a été constitué pour conseiller la Commission et fournir une expertise sur la mise en œuvre des actions de la nouvelle stratégie de l'UE en faveur des sols (European Commission, 2021), y compris l'élaboration d'une proposition de loi sur la santé des sols. INRAE est également sollicité dans le cadre

Tableau 1 - Visites, expertises, formations et présentations internationales réalisées dans le cadre des programmes du GIS Sol
Table 1 - *International visits, expertises, training courses and presentations realized under the framework of the GIS Sol programmes*

Continent	Pays/organisations	Visites à InfoSol	Expertise dans les pays / organisations	Formations à InfoSol	Formations dans les pays	Invitation de présentations générales dans les pays
Europe	Allemagne (Thunen Institute)					
	Allemagne/Délégation d'organismes forestiers					
	Belgique/ Univ. Gembloux et Louvain la Neuve					
	Commission Européenne/Délégation de la commision des affaires étrangères					
	Commission Européenne-DG ENV					
	COP21 Side event (Paris, France)					
	Irlande/TEAGASC					
	Italie EXPO-MILANO - Side event					
	JRC/Ispra/ESDAC					
	Luxembourg/ Département Sol du Ministère de l'Agriculture					
	Pays-Bas (ISRIC/WUR)					
	Suisse (OFEV)					
Reste du monde	Afrique du Sud (Universités et Gouvernement)					
	Argentine (INTA)					
	Australie (Victoria state et Univ. Sydney)					
	Barhein (Gulf University)					
	Canada (Univ. Laval et AQSSS)					
	Chili/ Univ. Santiago					
	Chine (Délégation du Ministère de l'Environnement)					
	COP22 Side event (Marrakech, Maroc)					
	Corée du Sud/Univ. Kwangon et RDA					
	Costa-Rica /Agence française de développement					
	Délégation d'Instituts forestiers de divers continents					
	FAO - Nations Unies					
	Inde/NBSSS-LUP					
	Indonésie (National Research and Innovation Agency) *Reporté-raisons sanitaires*					
	Japon/Délégation du Ministère de l'Agriculture					
	Maroc/INRA Marocain					
	Nouvelle-Zélande/Landcare Research					
	Philippines/ Ministères agriculture et affaires étrangères - Université - Rice Research Institute					
	Russie/ Dokutchaev Institute					
	Sénégal (Service national des sols)					
	Thaïlande/LDD					

des programmes du European Soil Partnership de l'UN-FAO comme par exemple pour la production de la carte mondiale du carbone des sols, (http://54.229.242.119/GSOCmap/). Le GIS Sol a également contribué à leur élaboration et à la déclinaison nationale de directives européennes :

- Participation de C. Le Bas (INRAE) comme experte sol au groupe de travail thématique sol pour la définition des spécifications des données sols dans le cadre de l'implémentation de la directive INSPIRE (INSPIRE Thematic Working Group Soil, 2013).
- Participation de C. Le Bas (INRAE) comme experte sol au groupe de travail du JRC pour la définition des critères sols de délimitation des zones défavorisées simples (Eliasson *et al.*, 2010).
- Elaboration de méthodologies pour la délimitation des zones humides, qui a permis d'élaborer une première enveloppe nationale des milieux potentiellement humides au 1/100 000ème par approche semi-automatique (Berthier *et al.*, 2014 ; https://geosas.fr/web/?page_id=1723).
- Mise en place, à la demande de la Commission Européenne, de méthodologies de délimitation des zones présentant un risque d'érosion (Antoni *et al.*, 2006 ; Cerdan *et al.*, 2006, 2010 ; Daroussin *et al.*, 2019).
- Contribution à la délimitation des Zones Défavorisées Simples (ZDS) de France, suite à une commande de l'Union Européenne à chaque État Membre, dans l'objectif de revoir le classement des communes classées au titre du handicap naturel (hors zones de montagnes). Les critères ont été définis sur des indicateurs physiques (sol, climat, relief) et également sur des critères technico-économiques (https://agriculture.gouv.fr/aides-aux-exploitations-classement-en-zone-defavorisee).

Au plan mondial, les partenaires du GIS Sol ont été, et sont encore, fortement impliqués dans le Partenariat Mondial sur les Sols de la FAO (GSP) à plusieurs titres :

- Membre du panel intergouvernemental sur les sols (ITPS) du GSP 2013-2015.
- Implication dans l'écriture du 1er rapport sur l'état des ressources en sols du Monde (https://www.fao.org/documents/card/fr/c/b7710883-a9fb-4513-9a90-0134f0da26c9/) et dans la révision de la Charte mondiale sur les sols (ITPS-FAO, 2015).
- Représentants auprès du GSP et de l'INSII (International Network of Soil Information Institutions, https://www.fao.org/global-soil-partnership/insii/en/).
- Membres de comités de pilotage scientifique de piliers du GSP.
- Fournitures de cartes françaises dans le cadre de la politique de cartographie mondiale du GSP (http://54.229.242.119/GSOCmap/).
- Approbation des spécifications de *GlobalSoilMap par le GSP.*

Le GIS Sol contribue aussi activement au rapportage du bilan de gaz à effet de serre de la France. Il fournit, à la demande du CITEPA, les niveaux de référence des stocks de carbone organique des sols, utilisés pour le volet Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) (CITEPA, 2022).

En tant que point focal français de l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE), le Service des données et des études statistiques (SDES) du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, qui co-préside également le GIS Sol, s'appuie sur l'expertise française sur les sols du GIS Sol et sur ses données pour répondre aux demandes de l'AEE. Le GIS Sol contribue donc fortement au rapportage sur les sols dans le cadre des actions de l'AEE et apporte son appui pour la relecture de ses publications phares (*e.g.* EEA 2010; EEA 2019 ; EEA 2020 ; EEA 2022). Depuis 2019, le GIS Sol apporte également son appui dans des groupes de travail particuliers : Convention Alpine, Working Group Soil Protection of the Alpine Convention (sites de surveillance), FAO/GSP/convention on biological diversity (National Survey on Status of So*il Biodiversity: Knowledge, Challenges and Opportunities), etc.*

La normalisation internationale sur les sols est conduite au niveau du comité technique TC190 « Qualité du sol » (https://www.iso.org/committee/54328.html) créé en 1985. Au cours des 15 dernières années, plusieurs membres du GIS Sol se sont investis dans divers travaux aboutissant à des normes techniques, par exemple, sur la mesure des stocks de carbone dans les sols ou encore d'échange de données sur les sols (respectivement ISO, 2021, ISO, 2013-2019) et la norme de description des sols (ISO 24177, 2019). Michel Brossard (IRD), Antonio Bispo (INRAE) et Elsa Limasset (BRGM) animent divers groupes de travail (en anglais WG : Working Group) sur le vocabulaire (WG2) (ISO, 2015), les liens entre le sol et le climat (WG1), les fonctions et services rendus par les sols (WG3) et l'évaluation des impacts (SC7 : sous-comité n°7 en charge de l'évaluation des impacts). Cette implication, depuis des années, permet une veille sur les travaux en cours mais également d'influencer les normes par rapport aux pratiques nationales comme, par exemple, pour la surveillance à long terme des sols ou la conservation des échantillons (ISO, 2018 ; ISO, 2007). Le WG1 s'intéresse aussi à la pertinence de l'action normative dans la recherche et l'accompagnement des politiques publiques (Bispo *et al.*, 2017). Enfin, il convient de souligner que l'action française a été à l'origine de la création sous leur forme actuelle des groupes de travail WG1, WG2 et WG3 qui ont vocation à une action transversale dans le cadre du TC 190. Les principaux membres français suivent aussi la qualité de l'édition de normes ISO en langue française.

DISCUSSION

Dans cette section nous tentons de replacer les actions du GIS Sol dans l'évolution du contexte international. Nous soulignons les points pour lesquels le GIS Sol a été particulièrement moteur, source d'innovation et d'inspiration. Nous relativisons aussi son influence par rapport aux efforts menés par d'autres organismes ou instances politiques. Nous discutons enfin des bénéfices et des contraintes pour le GIS Sol qui ont été générées par cette reconnaissance internationale.

Quelles méthodologies ont été développées dans le GIS Sol puis adoptées par d'autres ?

Souvent en science, les idées naissent de façon plus ou moins parallèles, favorisées en cela par des échanges de plus en plus rapides et nombreux au sein des communautés scientifiques. Il est donc difficile d'attribuer la paternité d'une idée à un seul groupe de scientifiques. Nous essayons néanmoins de dégager quelques faits marquants pour lesquels il nous semble que le GIS Sol a été particulièrement moteur :

- La mise en place de la couverture totale d'un territoire par un dispositif de surveillance systématique et représentatif de tous les sols et toutes les occupations. Certes, quelques pays avaient anticipé cette initiative (*e.g.* Angleterre et Pays de Galles, Hongrie), mais elle était loin d'être aussi développée qu'actuellement. On peut dire que la campagne « BioSoil », initiée par l'Europe en 2006-2008, mais restreinte aux sols forestiers, a été favorisée par l'existence et les premiers résultats du RMQS. Il en est de même pour les campagnes successives LUCAS-Soil portées par l'Union Européenne depuis 2009, même si, dans ce dernier cas, ce n'est pas une grille qui a été retenue, par souci d'économie et de cohérence des actions européennes, mais une sélection de points sur la base d'une autre grille préexistante destinée à suivre les changements d'occupation des sols. Cette sélection de points sur la base de leur « représentativité » par un mode de sélection de type « hypercube latin » sur des co-variables reste discutable - et très discutée - au plan statistique, de même que le choix de privilégier les sols agricoles. Mais elle est inspirée des mêmes stratégies de représentativité et d'une couverture la plus exhaustive possible.

- Le choix de développer un conservatoire d'échantillons (Ratié *et al.*, 2010). Cette stratégie, extrêmement payante au plan scientifique, a également ensuite été reprise par de nombreux pays, mais aussi au plan européen dans le cadre de LUCAS-Soil. Le GIS Sol ne fut pas le premier à développer cette stratégie. Elle avait été développée depuis des décennies dans le cadre de quelques essais de longue durée « patrimoniaux », et beaucoup plus rarement, de façon systématique, par quelques pays dont, par exemple, l'Australie, les Etats-Unis ou la Suisse.

- Le choix, en lien direct avec la conservation des échantillons, de développer des nouvelles techniques comme la spectrométrie, ou l'extraction et la purification de l'ADN, sur de très larges gammes d'échantillons. Puis de développer progressivement, sur les plateformes logistiques du RMQS et du conservatoire, de nouvelles observations complémentaires. Aujourd'hui, les bibliothèques spectrales de sols se développent partout dans le monde (*e.g.* Stevens *et al.*, 2014 ; Terra *et al.*, 2015 ; Viscarra Rossel *et al.*, 2016 ; Chen *et al.*, 2021), et les premières cartes de la diversité microbienne des sols de France (Dequiedt *et al.*, 2009 ; Ranjard *et al.*, 2010, 2013 ; Karimi *et al.*, 2018) peuvent être considérées comme des premiers pas vers de gigantesques avancées de la biologie moléculaire au service de l'écologie des sols (Arriba *et al.*, 2021).

- La prise de conscience de l'urgence du sauvetage de données anciennes (Arrouays *et al.*, 2017b) par de nombreux pays (Russie, Brésil, Inde, Iran, Chine, Afrique, Chile, Argentine, Mexique…), ainsi que celle d'avoir une base de données complète et harmonisée de l'inventaire cartographique des sols, ont provoqué une accélération remarquable de la cartographie dans certains pays (Luxembourg, Italie, nombreux pays africains et d'Amérique du Sud…), ainsi que de son harmonisation (Hongrie, Turquie, Chili, Mexique, Amérique centrale, Canada, Thaïlande…).

- Le développement de méthodes de cartographie par modélisation statistique, ou « Digital Soil Mapping » (DSM) pour délivrer des produits opérationnels qui sortent du monde strict de la recherche (*e.g.* Grinand *et al.*, 2008 ; Arrouays *et al.*, 2014, 2017a ; Mulder *et al.*, 2016a, 2016b). Certes, il convient ici de relativiser encore le rôle du GIS Sol, car la montée en puissance de la cartographie numérique en matière de recherche a été bien antérieure à la création du GIS Sol (*e.g.* Legros et Bonneric, 1979 ; Lagacherie et Depraetere, 1991 ; Bell *et al.*, 1992, 1994 ; Odeh *et al.*, 1994 ; Arrouays *et al.*, 1995 ; Lagacherie *et al.*, 1995 ; Lagacherie et Holmes 1997 ; De Bruin et Stein, 1998 ; Bui *et al.*, 1999). Au plan opérationnel, le DSM s'est développé de façon quasi-simultanée à la création du GIS Sol (McBratney *et al.*, 2003) et généralisé ensuite dans le monde entier (Minasny et McBratney, 2016 ; Arrouays *et al.*, 2021a, 2021b ; Chen *et al.*, 2022). On peut néanmoins penser, sans fausse modestie, que l'exemple et le leadership de la France (*e.g.* Lagacherie *et al.*, 2007 ; Arrouays *et al.*, 2014, 2017a) ont contribué à accélérer cette tendance.

Qu'est-ce qui a pesé le plus dans le rayonnement international du GIS Sol ?

Cette question a pour partie été traitée dans la section précédente en ce qui concerne le développement de méthodes et de programmes originaux (mode d'échantillonnage,

variables novatrices ajoutées progressivement, conservatoire, harmonisation des programmes de cartographie et des bases de données, développement de la cartographie numérique des sols et du traitement des données, publications « pionnières »…). En ce qui concerne la structuration du GIS Sol, associant dans un objectif partagé les ministères, des agences nationales et la recherche avec l'appui d'un vaste réseau de partenaires, il convient de rester plus modeste. Certes, les programmes du GIS Sol n'auraient pas connu le succès international qu'ils ont eu sans cette structuration originale. De là à dire qu'elle a été considérée comme un modèle à suivre, il y a un pas trop grand à franchir. Ce qui est certain, c'est que le contexte international avant la création du GIS Sol était assez différent d'aujourd'hui. Le JRC était en position de leader européen sur les sols, mais sa vraie montée en puissance au plan de l'impact scientifique international est principalement due à la mise en place de LUCAS-Soil (Orgiazzi *et al.*, 2018), qui est partie, dès 2009, d'une volonté politique à l'échelle européenne, sur un modèle inspiré du RMQS. Une des forces du JRC est d'être une DG de la Commission Européenne, où la politique et la recherche sont liées et où le partenariat peut s'appuyer sur les organismes des pays membres de l'Union Européenne. Il en est de même pour le partenariat mondial pour les sols (GSP) : en faisant remonter les sols à l'agenda de la FAO des Nations Unies, le GSP a pu fédérer les pays pour délivrer des produits (cartes, rapports, articles, etc.) et mobiliser pour ce faire des acteurs internationaux. Le GIS Sol avait anticipé ces types de fédération et de structuration au niveau français (Arrouays *et al.*, 2022), d'où son rayonnement « précoce », mais sans avoir créé ces programmes et structures internationaux, même s'il a pu en être une source d'inspiration.

Ainsi, la vision et la conviction très précoces du GIS Sol quant à l'importance des données sol ont été à l'origine de son succès et de sa reconnaissance comme pionnier. Cette vision a été suivie par de nombreux pays, mais aussi déployée et démultipliée par des organisations internationales.

Quels bénéfices et contraintes à ce rayonnement international pour le GIS Sol ?

Les succès et la reconnaissance attirent les sollicitations. Certains partenaires du GIS Sol ont pu être de plus en plus sollicités et impliqués dans des programmes bilatéraux, européens, des comités d'organisations mondiales (Union Internationale des Sciences du Sol, GSP-FAO des Nations Unies, ISO). Cette montée internationale a pu être perçue comme une contrainte, « détournant » une partie du temps des personnels vers des activités dépassant les objectifs stricts du GIS Sol, retardant ainsi la mise en place du système d'information sur les sols de France. Inversement, elle a offert l'opportunité de démultiplier les efforts et de mieux valoriser les données du GIS Sol, tant au plan français, qu'international. Aujourd'hui, les enjeux sur les sols sont mondiaux, et ne pas prendre en compte les effets sur d'autres pays de la gestion française des sols et des filières agricoles serait une erreur. Il en est de même des transferts de contaminants ou de sédiments entre pays *via* les pollutions d'origine atmosphériques, ou les transports via l'érosion et les grands fleuves. La recherche est elle-même mondialisée, et le rayonnement du GIS Sol permet de nouer des collaborations avec de nouveaux spécialistes, de favoriser son impact multidisciplinaire, de renforcer son attractivité en attirant de nouveaux talents (doctorants, post-doctorants, visiteurs étrangers). Cette attractivité du GIS Sol est d'une importance considérable, car elle permet de mieux valoriser toutes ses données, de tester des méthodes innovantes d'analyses de sol ou de traitement des données. Les retombées sont positives, tant pour une meilleure connaissance et gestion des sols de France, que pour la production de connaissances et d'innovations génériques sur les plans scientifique et technologique.

Au plan de la politique internationale (UE, FAO), la montée en puissance du GIS Sol a aussi permis un meilleur positionnement de la France dans le concert des organisations et des nations qui sont à l'origine des propositions de législations sur les sols d'Europe et du monde ; la « voix » de la France dans les négociations internationales est aujourd'hui mieux entendue qu'avant la création du GIS Sol.

CONCLUSIONS

Le modèle de structure de gouvernance partagée du GIS Sol, ses programmes originaux et complémentaires, certaines de ses spécificités, comme par exemple, le réseau de surveillance, le conservatoire, les programmes de récupération en masse de données, l'intégration de programmes multi-échelles de cartographie des sols, les bases de données centralisées, harmonisées et partagées, et le sauvetage de données anciennes, ont contribué au rayonnement et à l'influence du GIS Sol à l'international. Le GIS Sol est également un lieu d'échange d'informations qui permet aux différents membres de prendre connaissance des tendances et des orientations à travers l'implication de chacun dans divers réseaux européens et internationaux. Le cas échéant, il permet de se partager la charge de représentation dans diverses instances et d'amplifier l'influence française dans les négociations internationales.

Il n'est pas toujours facile de démêler ce qui a relevé d'une action propre du GIS Sol, ou de celle d'une ou de plusieurs tutelles, seules ou en synergie. Quoiqu'il en soit, de nombreux faits marquants indiquent que le GIS Sol et ses membres ont été particulièrement actifs et furent à l'origine de nombreuses initiatives.

Ceci s'est traduit par une montée en puissance du leadership scientifique et politique de nombreux partenaires du GIS Sol, ainsi que par la contribution à une meilleure fédération des efforts en matière de sauvetage de données, de constitution

et d'harmonisation de bases de données et de programmes d'acquisition, ainsi que par l'implication du GIS Sol au niveau des politiques et des rapportages européens et mondiaux sur les sols et des actions de normalisation internationales.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les deux relectrices Claire Chenu et Clara Savary pour leurs critiques très utiles et constructives d'une première version de cet article. Nous adressons tous nos remerciements aux tutelles du GIS Sol, pour leur soutien, leur confiance, et l'ensemble des efforts qu'ils ont consentis. Nous adressons également nos remerciements à tous les partenaires du GIS Sol, qu'il s'agisse de partenaires financiers, techniques ou scientifiques. Dominique Arrouays, Manuel P. Martin, Philippe Lagacherie et Anne C. Richer-de-Forges sont membres du consortium international de recherches GLADSOILMAP soutenu par « LE STUDIUM Loire Valley Institute for Advanced Research Studies ».

This work benefited from researches established in the framework of the EU EJP Soil "Towards climate-smart sustainable management of agricultural soils" (grant no. 862695).

Nous remercions Dominique King et Marcel Jamagne, pour leur vision très précoce de l'importance d'une structuration européenne regroupant les organismes en charge de la cartographie des sols en Europe (Bureau européen des sols) et leur soutien sans faille à la création et aux actions du GIS Sol.

BIBLIOGRAPHIE

Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W., Olson C., Sztein A.E., Sparks D.L. (2015). Soil and human security in the 21st century. Science 348, 1261071. https://doi.org/10.1126/science.1261071

Antoni V., Le Bissonnais Y., Thorette J., Zaidi N., Laroche B., Barthès S., Daroussin J., Arrouays D. (2006). Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250.000 et confrontation aux enjeux locaux. Etude et Gestion des Sols, 13(3), 201-222.

Antoni V., Soubelet H., Rayé G., Eglin T., Bispo A., Feix I., Slak M.F., Thorette J., Fort J.-L., Sauter J. (2019). Contribution of knowledge advances in soil science to meet the needs of French state and society. *In:* Global Soil Security: Towards More Science-Society Interfaces: Proceedings of the Global Soil Security 2016 Conference, December 5-6, 2016, Paris, France. 1st Edition. Eds: Anne Richer-de-Forges A.C., Carré F., McBratney A.B., Bouma J., Arrouays, D. Taylor & Francis, London, pp. 33-42.

Arribas P., Andujar C., Bidartondo M.I., Bohmann K., Coissac E., Creer S., deWaard J.R., Elbrecht Vasco., Ficetola G.F., Goberna M., Kennedy S., Krehenwinkel H., Leese F., Novotny V., Ronquist F., Yu D.W., Zinger L., Creedy T.J., Meramveliotakis E., Noguerales V., Overcast Isaac., Morlon H., Vogler A.P., Papadopoulou A., Emerson B.C. (2021). Connecting high-throughput biodiversity inventories: Opportunities for a site-based genomic framework for global integration and synthesis. Molecular Ecology, 30(5), 1120-1135. DOI : 10.1111/mec.15797.

Arrouays D., Dawson L. (2022). Soil Priorities around the World - An introduction. Geoderma Regional, 30, e00555, DOI: https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00555.

Arrouays D., Grundy M.G., Hartemink A.E., Hempel J.W., Heuvelink G.B.M., Hong S.Y., Lagacherie P., Lelyk G., McBratney A.B., McKenzie N.J. Mendonça-Santos M.d.L., Minasny B., Montanarella L., Odeh I.O.A., Sanchez P.A., Thompson J.A., Zhang G.-L. (2014). GlobalSoilMap: towards a fine-resolution global grid of soil properties. Advances in Agronomy, 125, 93-134. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800137-0.00003-0.

Arrouays D., Lagacherie P., Hartemink A. (2017a). Digital soil mapping across the globe. Geoderma Regional, 9, 1-4.

Arrouays D., Leenaars J., Richer-de-Forges A.C., Adhikari K., Ballabio C., Greve M., Grundy M., Guerrero E., Hempel J., Hengl T., Heuvelink G., Batjes N., Carvalho E., Hartemink A., Hewitt A., Hong S.-Y., Krasilnikov P., Lagacherie P., Lelyk G., Libohova Z., Lilly A., McBratney A., Mckenzie N., Vasques G., Mulder V.L., Minasny B., Montanarella L., Odeh I., Padarian J., Poggio L., Roudier P., Saby N., Savin I., Searle R., Stolbovoy V., Thompson J., Smith S., Sulaeman Y., Vintila R., Viscarra Rossel R., Wilson P., Zhang G.-L., Swerts M., van Oorts K., Karklins A., Feng L., Ibelles Navarro A.R., Levin A., Laktionova T., Dell'Acqua M., Suvannang N., Ruam W., Prasad J., Patil N., Husnjak S., Pásztor L., Okx J., Hallet S., Keay C., Farewell T., Lilja H., Juilleret J., Marx S., Takata Y., Kayusuki Y., Mansuy N., Panagos P., van Liedekerke M., Skalsky R., Sobocka J., Kobza J., Eftekhari K., Kazem Alavipanah S., Moussadek R., Badraoui M., da Silva M., Paterson G., da Conceição Gonçalves M., Theocharopoulos S., Yemefack M., Tedou S., Vrscaj B., Grob U., Kozak J., Boruvka L., Dobos E., Taboada M., Moretti L., Rodriguez D. (2017b). Soil legacy data rescue via GlobalSoilMap and other international and national initiatives. GeoRes J, 14, 1-19.

Arrouays D., Morvan X.P.P., Saby N.P.A., Richer-de-Forges A.C., Le Bas C., Bellamy P.H., Berényi Üveges J., Freudenschuß A., Jones A.R., Jones R.J.A., Kibblewhite M.G., Simota C., Verdoodt A., Verheijen F.G.A. (eds) (2008). Environmental Assessment of Soil for Monitoring: Volume IIa Inventory & Monitoring. EUR 23490 EN/2A, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 188 pp.

Arrouays D., Mulder V.L., Richer-de-Forges A.C. (2021a). Soil mapping, digital soil mapping and soil monitoring over large areas and the dimensions of soil security - A review. Soil Security, 5, 100018.

Arrouays D, Saby N.P.A., Boukir H., Jolivet C., Ratié C., Schrumpf M., Merbold L., Gielen B., Gogo S., Delpierre N., Vincent G., Klumpp K., Loustau D. (2018a). Soil sampling and preparation for monitoring soil carbon. International Agrophysics, 32, 633-643. doi:10.1515/intag-2017-0047.

Arrouays D., Savin I.Y., Leenaars J.G.B., McBratney A.B. (eds). (2018b). GlobalSoilMap. Digital soil mapping from country to globe. Taylor&Francis CRC Press, London. 174 p.

Arrouays D., McBratney A.B., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A.C., Morgan C., Roudier P., Poggio L., Mulder V.L. (2020a). Impressions of digital soil maps: the good, the not so good, and making them ever better. Geoderma Regional. 20, e00255. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255

Arrouays D., Poggio L., Mulder V.L., Salazar Guerrero O. (2021b). Digital soil mapping and GlobalSoilMap- Scientific advances and the operational use of digital soil mapping to address global environmental challenges. Geoderma Regional 26, e00414. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00414

Arrouays D., Poggio L., Salazar Guerrero O.A., Mulder V.L. (2020b). Digital soil mapping and GlobalSoilMap. Main advances and ways forward. Geoderma Regional 21, e00265. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00265

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. Etude et Gestion des Sols, 29, 365-379.

Arrouays D., Vion I., Kicin J.-L. (1995). Spatial analysis and modeling of topsoil carbon storage in temperate forest humic loamy soils of France. Soil Science. 159, 191 - 198.

Baruth B., Genovese G., Montanarella L. (eds.) (2006). New soil information for the MARS Crop Yield Forecasting System. European Commission, Joint Research Centre (DG JRC), Institute for the Protection and Security of the Citizen (IPSC), Ispra, Italie, 108 pages.

Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W. (1992). Calibration and validation of a soil-landscape model for predicting soil drainage class. Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 1860-1866.

Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W. (1994). Soil drainage probability mapping using a soil - landscape model. Soil Science Society of America Journal, 58, 464 - 470

Berthier L., Bardy M., Chenu J.-P., Guzmova L., Laroche B., Lehmann S., Lemercier B., Martin M.P., Mérot P., Squividant H. (2014). Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine-notice d'accompagnement. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France. Ministère d'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

Bispo A., Andersen L., Angers D., Bernoux M., Brossard M., Cécillon L., Comans R., Harmsen J., Jonassen K., Lamé F., Lhuillery C., Maly S., Martin E., Mcelnea A., Sakai H., Watabe Y., Eglin T. (2017). Accounting for carbon stocks in soils and measuring emissions fluxes of GhGs from soils: do we have the necessary standards? Frontiers in Environmental Science, section Soil Processes, July 2017/Vol. 5 / Article 41 ; doi: 10.3389/fenvs.2017.00041

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://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_Deliverable_6.3_Dec_2021_final.pdf

Bispo A., Le Bas C. (2021). Is there a role of EU national soil data organizations in contributing to EUSO? The French example. EUSO Stakeholders Forum, Joint Research Centre, Oct 2021, Conférence virtuelle, Italy.

Bispo A., Fantappiè M., van Egmond F., Smreczak B., Bakacsi Z., Hessel R., Wetterlind J., Siebelec G., Jones A. (2022). A review of existing soil monitoring systems to pave the way for the EU Soil Observatory. World Congress of Soil Science, 1-5 août 2022, Glasgow, Royaume Uni.

Bispo A., *et al., (à paraître).* Les différents programmes du GIS Sol : qu'avons-nous fait de nos 20 ans ? Etude et Gestion des Sols, numéro spécial « 20 ans du GIS sol ».

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

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.

Bouma J. (2020). Soil security as a roadmap focusing soil contributions on sustainable development agendas. Soil Security 1, 100001. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2020.100001.

Bui E.N., Loughhead A., Corner R. (1999). Extracting soil - land-scape rules from previous soil surveys. Australian Journal of Soil Research. 37, 495 - 508

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, 337, 99-110. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.007

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., King C., Antoni V., Surdyk N., Dubus I., Arrouays D., Desprats J.F. (2006). Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales. BRGM/RP-55104-FR, p. 87.

Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y., Van Oost K., Poesen J., Saby N.P.A., Gobin A., Vacca A., Quinton J.L., Auerswald K., Klik A., Kwaad F.J.P.M., Raclot D., Ionita I., Rejman J., Rousseva S., Muxart T., Roxo M.J., Dostal T. (2010). Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. Geomorphology, 122, (1/2), 167-177.

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

Chen S., Xu H., Dongyun D., Ji W., Li S., Yang M., Hu B., Zhou Y., Wang N., Arrouays D., Shi Z. (2021). Evaluating validation strategies on the performance of soil property prediction from regional to continental spectral data. Geoderma, 400, 115159. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115159.

Chen S., Arrouays D., Mulder V.-L., Poggio L., Minasny B., Roudier P., Libohova Z., Lagacherie P., Shi Z., Hannam J., Meersmans J., Richer-de-Forges A.C., Walter C. 2022. Digital mapping of *GlobalSoilMap* soil properties at a broad-scale: A review. Geoderma, 409, 115567.

Citeau L., Bispo A., Bardy M., King D. (eds) (2008). Gestion durable des sols. Collection : Savoir-faire. Editions Quae, France. 336 p.

CITEPA, 2022. Rapport OMINEA - 19ème édition. 1079 pages. https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/ominea/OMINEA-2022v2.pdf.

Commission Européenne. (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) 232 final. 31p. Version française disponible sur : https://www.senat.fr/europe/textes_europeens/e3251.pdf (consulté le 30/09/2022).

De Bruin S., Stein A. (1998). Soil - Landscape modeling using fuzzy c-means clustering of attribute data derived from a Digital Elevation Model (DEM). Geoderma. 83, 17 - 33.

Daroussin J., King D., Le Bas C., Vrscaj B., Dobos E., Montanarella L. (2006). Chapter 4: The Soil Geographical DataBase of Eurasia at scale 1:1,000,000: history and perspective in Digital Soil Mapping. Developments in soil science, 31, 55-65.

Daroussin J., Cousin I., Tibi A., Le Bissonnais Y., Girardin A., Meillet A., Choler P., Therond O. (2019). Evaluating the "Soil stabilisation and control of erosion" ecosystem service provided by agricultural ecosystems over the French territory. Global Symposium on Soil Erosion, May 2019, Rome, Italy. pp. 93-97.

Dequiedt S., Thioulouse J., Jolivet C., Saby N.P.A., Lelievre M., Maron P.A., Martin M.P., Chemidlin-Prévost-Bouré N., Arrouays D., Lemanceau P., Ranjard L. (2009). Biogeographical Patterns of Soil Bacterial Communities. Environ. Microbiol. Reports, 1(4), 251-254.

Dewitte O., Jones A., Spaargaren O., Breuning-Madsen H., Brossard M., Dampha, A., Deckers J., Gallali T., Hallett S., Jones R.J.A., Kilasara M., Le Roux P., Micheli E., Montanarella L., Thiombiano L., Van Ranst E., Yemefack M., Zougmore R. (2013). Harmonisation of the soil map of Africa at the continental scale. Geoderma, 211, 138-153. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.07.007.

Dharumarajan S., Hedge R., Singh J.S.K. (2019). The need for digital soil mapping in India. Geoderma Regional. 16, e00204. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00204.

Dunning A., de Smaele M., Böhmer V. (2017). Are the FAIR Data Principles Fair? International Journal of Digital Curation, 12(2), 177-195. DOI: 10.2218/ijdc.v12i2.567.

Eckelmann W., Baritz R., Bialousz S., Bielek P., Carré F., Houšková B., Jones R.J.A., Kibblewhite M.G., Kozak J., Le Bas C., Tóth G., Tóth T., Várallyay G., Yli Halla M., Zupan M. (2006) . Common Criteria for Risk Area Identification according to Soil Threats. European Soil Bureau Research Report No.20, EUR 22185 EN, 94 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

EEA. (2010). The European environment — state and outlook: Thematic assessment — Soil, 2010. 48 p. [online : https://www.eea.europa.eu/soer/europe/soil/at_download/file]

EEA. (2019). EEA Signals : Land and soil in Europe. 60 pages [online: https://www.eea.europa.eu/publications/eea-signals-2019-land]

EEA. (2020). SOER 2020, Chapter 5 Land and soil. [online: https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020/#page=113]

EEA. (2022, sous presse). Soil monitoring in Europe Indicators and thresholds for soil health assessments.

Eliasson A., Jones R.J.A., Nachtergaele F., Rossiter D.G., Terres J.-M., Van Orshoven J., van Velthuizen H., Böttcher K., Haastrup P., Le Bas C. (2010). Common criteria for the redefinition of Intermediate Less Favoured Areas in the European Union. Environmental Science and Policy, 13, 766-777.

ESBN. (2005a). Soil Atlas of Europe. European Commission, 128 pp, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

ESBN. (2005b). Soil Resources of Europe, second edition. R.J.A. Jones, B. Houšková, P. Bullock and L. Montanarella (eds). European Soil Bureau Research Report No.9, EUR 20559 EN, (2005), 420pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

European Commission. (2016). Guidelines on FAIR data management in Horizon 2020 (3rd ed.). European Commission - Directorate-General for Research and Innovation. Retrieved from: http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/grants_manual/hi/oa_pilot/h2020-hi-oa-data-mgt_en.pdf

European Commission. (2021). COM (2021) 699 final - Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. EU Soil Strategy for 2030. Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699.

Franz D., Acosta M., Altimir N., Arriga N., Aubinet M., Aurela M., Arrouays D., Edward Ayres E., López-Ballesteros A., Barbaste M., Berveiller D., Boukir H., Brown T., Brümmer C., Buchmann N., Burba G., Carrara A., Cescatti A., Ceschia E., Clement R., Cremonese E., Crill P., Dařenová E., Dengel S., D'Odorico P., Fleck S., Fratini G., Fuß R., Gielen B., Gogo S., Grace J., Graf A., Gross P., Grünwald T., Haapanala S., Hehn M., Heinesch B., Heiskanen J., Herbst M., Hörtnagl L., Ibrom A., Jolivet C., Joly L., Jones M., Kiese R., Klemedtsson L., Kljun N., Klumpp K., Kolari P., Kolle O., Kowalski A., Kutsch W., Laurila T., de Ligne A., Linder S., Lindroth A., Lohila A., Longdoz B., Mammarella I., Manise T., Marañón Jiménez S., Matteucci G., Matthias M., McDermitt D.K., Meier P., Merbold L., Mereu S., Metzger C., Metzger S., Migliavacca M., Mölder M., Montagnani L., Moureaux C., Nelson D., Nemitz E., Giacomo G., Nilsson M.B., Op de Beeck M., Osborne B., Ottosson Löfvenius M., Pavelka M., Peichl M., Peltola O., Pihlatie M., Pitacco A., Pokorny R., Pumpanen J., Ratié C., Rebmann C., Roland M., Simone Sabbatini S., Saby N.P.A., Saunders M., Schmid H.P., Schrumpf M., Sedlák P., Serrano Ortiz P., Siebicke L., Šigut L., Silvennoinen H., Simioni G., Skiba U., Sonnentag O., Soulé P., Steinbrecher R., Tallec T., Thimonier A., Tuittila E.-S., Tuovinen J.-P., Vestin P., Vincke C., Vitale D., Waldner P., Weslien P., Wingate L., Wohlfahrt G., Zahniser M., Vesala T. (2018). Towards long-term standardised carbon and greenhouse gas observations for monitoring Europe´s terrestrial ecosystems. International Agrophysics, 32, 439-455. doi: 10.1515/intag-2017-0039.

Giller K.E. (2012). No silver bullets for African soil problems. Nature 485, 41-41. https://doi.org/10.1038/485041c.

Grinand C., Arrouays D., Laroche B., Martin M.P. (2008). Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. Geoderma, 143, 180-190.

Grinand C., Rajaonarivo A., Bernoux M., Pajot V., Brossard M., Razafimbelo T., Albrecht A., Le Martret H. (2009). Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. Étude et Gestion des Sols, 16, 1, 23-33.

Guevara M., Olmedo G.F., Stell E., Yigini Y., Aguilar Duarte Y., Arellano Hernández C., Arévalo G.E., Arroyo-Cruz C.E., Bolivar A., Bunning S., Bustamante Cañas N., Cruz-Gaistardo C.O., Davila F., Dell Acqua M., Encina A., Figueredo Tacona H., Fontes F., Hernández Herrera J.A., Ibelles Navarro A.R., Loayza V., Manueles A.M., Mendoza Jara F., Olivera C., Osorio Hermosilla R., Pereira G., Prieto P., Alexis Ramos I., Rey Brina J.C., Rivera R., Rodríguez-Rodríguez J., Roopnarine R., Rosales Ibarra A., Rosales Riveiro K.A., Schulz G.A., Spence A., Vasques G.M., Vargas R.R., Vargas R. (2018). No Silver Bullet for Digital Soil Mapping: Country-specific Soil Organic Carbon Estimates across Latin America (preprint). Soil and methods. https://doi.org/10.5194/soil-2017-40

Hartemink A.E., McBratney A.B. (2008). A soil science renaissance. Geoderma 148, 123-129. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.10.006

Hessel R., Daroussin J., Verzandvoort S., Walvoort D. (2014). Evaluation of two different soil databases to assess soil erosion sensitivity with MESALES for three areas in Europe and Morocco. Catena, 118, 234-247.

INSPIRE Thematic Working Group Soil. (2013). D2.8.III.3 INSPIRE Data Specification on Soil - Draft Guidelines. European Commission Joint Research Centre. 319 pages.

ISO. (2007). ISO 18512:2007. Soil quality — Guidance on long- and short-term storage of soil samples.

ISO. (2015). ISO 11074, 2015. Soil quality — Vocabulary.

ISO. (2018). ISO 16133:2018. Soil quality — Guidance on the establishment and maintenance of monitoring programmes.

ISO. (2013-2019). ISO 28258:2013/A1:2019. Soil quality - Digital exchange of soil-related data - Amendment 1 (ISO 28258:2013/Amd 1:2019).

ISO. (2019). ISO 25177:2019. Soil quality — Field soil description.

ISO. (2021). ISO 23400. 2021. Soil quality. Guidelines for the determination of organic carbon and nitrogen stocks and their variations in mineral soils at field scale.

ITPS-FAO (2015). Charte mondiale des sols révisée. FAO. Organisation Mondiale des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome. Version française. 7 p. https://www.fao.org/3/I4965F/i4965f.pdf (consulté le 30/09/2022)

Jamagne M., King D., Le Bas C., Daroussin J. (1995). Development and application of a European soil geographic database. Eurasian Soil Science, 27(4), 19-23.

Karimi B., Terrat S., Dequiedt S., Saby N.P.A., Horrigue W., Lelièvre M., Nowak V., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Bispo A., Maron P.-A., Chemidlin-Prévost Bouré N., Ranjard L. (2018). Spatial distribution and environmental drivers of soil bacterial and archaea phyla across France. Science Advances, 4, 7, eaaat 1808.

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., Moolenaar S., Mol G., Jansen B., Fresco L.O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. SOIL, 2(2), 111-128. https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016

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.

Lagacherie P. (1992). Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris comme référence. PhD thesis, Université Montpellier II, France.

Lagacherie P., Depraetere C. (1991). Analyse des relations sol-paysage au sein d'un secteur de référence en vue d'un zonage pédologique semi-automatisé d'une petite région naturelle. In: Riou, C. (Ed.), Le Zonage Agropédoclimatique. Séminaire Paris, 23 et 24 Mars 1989, pp. 116-138.

Lagacherie P., Legros J.P., Burrough P.A. (1995). A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. Geoderma, 65, 283 -301.

Lagacherie P., Holmes S. (1997). Addressing geographical data errors in a classification tree soil unit prediction. International Journal of Geographical Information Science, 11, 183 - 198.

Lagacherie P., McBratney A.B., Voltz M. (Eds), (2007). Digital Soil Mapping - An Introductory perspective. Elsevier, Amsterdam. 658 p.

Lal R., Bouma J., Brevik E., Dawson L., Field D.J., Glaser B., Hatano R., Hartemink A.E., Kosaki T., Lascelles B., Monger C., Muggler C., Ndzana G.M., Norra S., Pan X., Paradelo R., Reyes-Sánchez L.B., Sandén T., Singh B.R., Spiegel H., Yanai J., Zhang J. (2021). Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. Geoderma Regional, 25, e00398. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398

Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J., King D. (1998). Cartographie de l'aléa "Erosion des sols" en France. Ifen, Collection Etudes et Travaux n° 18, Août 1998. 77 pages.

Le Bissonnais Y., Daroussin J., Jamagne M., Lambert J.J., Le Bas C., King D., Cerdan O., Léonard J., Bresson L.M., Jones R. (2005). Pan-European soil crusting and erodibility assessment from the European Soil Geographical Database Using pedotransfer rules. Advances in Environmental Modelling and Monitoring, 2, 1-15.

Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King D. (2002). Mapping erosion risk for cultivated soil in France. Catena, 46, 207-220.

Legros J.P., Bonneric P. (1979). Modélisation informatique de la répartition des sols dans le Parc Régional Naturel du Pilat. Ann. Univ. Savoie. 63-68.

Lemercier B., Lagacherie P., Amelin J., Sauter J., Pichelin P., Richer-de-Forges A.C., Arrouays D. (2022). Multiscale evaluations of global, national and regional digital soil mapping products in France. Geoderma, 425, 116052. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116052

Leenaars J.G.B., Kempen B., van Oostrum A.J.M., Batjes N.H. (2014). Africa soil profiles database: a compilation of georeferenced and standardised legacy soil profile data for Sub-Saharan Africa. *In*: Arrouays D., McKenzie N.J., Hempel J.W., Richer-de-Forges A.C., McBratney A.B., (editors). *GlobalSoilMap*: basis of the global soil information system. Oxon: Taylor & Francis, CRC press ; pp. 51-57.

Loi Climat et résilience. (2021). Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021, portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924

Loubet B., Saby N.P.A., Lafont S., Gebleh M., Jolivet C., Ratié C., Chenu J.-P., Proix N. (2021). Soil sampling protocol and analysis by the ICOS ecosystem thematic center (ETC). *The ICOS France Science day 2021*. Understanding the greenhouse gases cycle in a warming Earth. Université de Reims, France, 12th-14th Oct. 2021.

Loustau D., Jolivet C., Lafont S., Loubet B., Klumpp K., Papale D., Arrouays D. (2017). ICOS Ecosystem Instructions for Soil Samples Collection and Preparation (Version 20201020). ICOS Ecosystem Thematic Centre. https://doi.org/10.18160/k3yc-td6h

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., Dimassi B., Román Dobarco M., Guenet B., Arrouays D., Angers D.A., Soussana J.-F., Pellerin S. (2021). Feasibility of the 4 per 1000 aspirational target for soil carbon. A case study for France. Global Change Biology, 27 (11), 2458-2477. doi: 10.1111/GCB.15547.

McBratney A.B., Mendonça Santos M.d.L., Minasny B. (2003). On digital soil mapping. Geoderma. 117, 3-52. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4.

McBratney A.B, Field D.J., Koch A. (2014). The dimensions of soil security. Geoderma, 213, 203-213. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013.

Minasny B., McBratney A.B. (2016). Digital soil mapping: a brief history and some lessons. Geoderma. 264, 301-311. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017.

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. https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016

Montanarella L. (2015). Agricultural policy: Govern our soils. Nature 528, 32-33. https://doi.org/10.1038/528032a

Morvan X.P.P., Saby N.P.A., Arrouays D., Le Bas C., Jones R.J.A., Verheijen F.G.A., Bellamy P.H., Stephens M., Kibblewhite M.G. (2008). Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonisation. Sci. Tot. Env., 391, 1-12.

Mulder V.-L., Lacoste M., Richer-de-Forges A.C., Martin M.P., Arrouays D. (2016a). National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. Geoderma, 263, 13-34.

Mulder V.-L., Lacoste M., Richer-de-Forges A.C., Arrouays D. (2016b). *GlobalSoilMap* France: High-resolution spatial modelling the soils of France up to two meter depth. Sci. Tot. Env., 573, 1352-1369.

Orgiazzi A., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Fernández-Ugalde O. (2018). LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. European Journal of Soil Science, 69, 140-153. doi: 10.1111/ejss.12499.

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.

Pérès G., Vandenbulcke F., Guernion M., Hedde M., Beguiristain T., Douay F., Houot S., Piron D., Richard A., Bispo A., Grand C., Galsomies L., Cluzeau D. (211). Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). Pedobiologia, 54, S77-S87. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.09.015

Ramifehiarivo N., Brossard M., Grinand C., Andriamananjara A., Razafimbelo T., Rasolohery A., Razafimahatratra H., Seyler F., Ranaivoson N., Rabenarivo M., Albrecht A., Razafindrabe F., Razakamanarivo H. (2017). Mapping soil organic carbon on a national scale: Towards an improved and updated map of Madagascar. Geoderma Regional, 9, 29-38. doi: 10.1016/j.geodrs.2016.12.002.

Ranjard L., Dequiedt S., Jolivet C., Saby N.P.A., Thioulouse J., Harmand J., Loisel P., Rapaport A., Fall S., Simonet P., Joffre R., Chemidlin-Prévost Bouré N., Maron P.A., Mougel C., Martin M.P., Toutain B., Arrouays D., Lemanceau P. (2010). Biogeography of Soil Microbial Communities: a Review and a Description of the Ongoing French National Initiative. Agronomy for Sustainable Development, 30(2), 359-365.

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 bacterial diversity is driven by wide-scale environmental heterogeneity. Nature Communications, 4, paper 1434.

Rasaei Z., Rossiter D.G., Farshad A. (2020). Rescue and renewal of legacy soil resource inventories in Iran as an input to digital soil mapping. Geoderma Regional. 21, e00262. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00262

Ratié C., Richer-de-Forges A.C., Berché P., Boulonne L., Toutain B., Saby N.P.A., Chenu J.-P., Laloua D., Ortolland B., Tientcheu E., Soler-Dominguez N., Jolivet C., Arrouays D. (2010). Le Conservatoire des Sols : La mémoire des sols de France. Étude et Gestion des Sols, 17 (3), 263-273.

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

Richer-de-Forges A.C., Carré F., McBratney A.B., Bouma J., Arrouays D. (eds). (2019a). Global Soil Security: Towards more science-society interfaces. Taylor & Francis, CRC Press, 137 p.

Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Bardy M., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemercier B., Sauter J., Voltz M. (2019b). Mapping of Soils and Land-Related Environmental Attributes in France: Analysis of End-Users' Needs. Sustainability 11, 2940. https://doi.org/10.3390/su11102940.

Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Poggio L., Chen S., Lacoste M., Minasny B., Libohova Z., Roudier P., Mulder V.L., Nédélec H., Martelet G., Lemercier B., Lagacherie P., Bourennane H. (2022). Hand-feel soil texture observations to evaluate the accuracy of digital soil maps for local prediction of particle size distribution. A case study in central France. Pedosphere, online, 5 July 2022. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.009.

Saby N.P.A., Jolivet C., Ratié C., Chenu J.-P., Loubet B., Ghebleh-Goydaragh M., Oapale D., Lafont S. (2022). Soil data of ICOS sites. On line: http://www.icos-etc.eu/icos/documents/instructions/soilsamp.

Samuel-Rosa A., Dalmolin R.S.D., Moura-Bueno J.-M., Teixeira W.G., Filippini Albad J.-M. (2020). Open legacy soil survey data in Brazil: geospatial data quality and how to improve it. Scienta Agricola. 77(1), e20170430. DOI : 10.1590/1678-992X-2017-0430.

Sanchez P.A., Ahamed S., Carré F., Hartemink A.E., Hempel J., Huising J., Lagacherie P., McBratney A.B., McKenzie N.J., Mendonca-Santos M.d.L., Minasny B., Montanarella L., Okoth P., Palm C.A., Sachs J.D., Shepherd K.D., Vagen T.-G., Vanlauwe B., Walsh M.G., Winowiecki L.A., Zhang G.-L. (2009). Digital Soil Map of the World. Science 325, 680-681. https://doi.org/10.1126/science.1175084.

Sandén T., Trajanov A., Spiegel H., Kuzmanovski V., Saby N.P.A., Picaud C., Bugge Henriksen C., Debeljak M. (2019). Development of an Agricultural Primary Productivity Decision Support Model: A Case Study in France. Front. Environ. Sci. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00058.

Sigal-Guille C., Demenois J., Chevallier T., Bénédet F., Le Bas C., Bispo A., Corbière P. (2023). Protection et diffusion des données sur les sols : des règles à comprendre pour mieux les intégrer aux recherches. Étude et Gestion des Sols, 30, 05-18. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2022/10/EGS_2023_30_Sigal-Guille_05-18.pdf.

Stevens A., Toth G., Panagos P., van Wesemael B., Montanarella L. (2014). Prediction of soil organic carbon content by diffuse reflectance spectroscopy using a local partial least square regression approach. Soil Biology and Biochemistry, 68, 337-347. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.022

Terra F.S., Demattê J.A.M., Viscarra Rossel R.A. (2015). Spectral libraries for quantitative analyses of tropical Brazilian soils: comparing vis-NIR and mid-IR reflectance data. Geoderma, 255-256, 81-93. DOI : 10.1016/j.geoderma.2015.04.017

Terrat S., Horrigue W., Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelièvre M., Nowak V., Tripied J., Régnier T., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Karimi B., Bispo A., Maron P.-A., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L. (2017). Mapping and predictive variations of soil bacterial richness across France. PLoS ONE, 12(10), e0186766. doi:10.1371/journal.pone.0186766

Van Camp G., Gentile A.-R., Bujarrabal B., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C., Selvaradjou S.K. (eds). (2004). Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. Volumes 1 to 6. JRC Publications Repository. 17 novembre 2004. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC28868.

van Egmond F., Fantappié M. (eds). (2021). D6.1. Report on harmonized procedures for creation of databases and maps. 391 p. https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_D6.1_Report_on_harmonized_procedures_for_creation_of_databases_and_maps__final.pdf

van Leeuwen J.P., Creamer R.E., Cluzeau D., Debeljak M.D., Gatti F., Henriksen C.B., Kuzmanovski V., Menta C.M., Peres G., Picaud C., Saby N.P.A., Trajanov A., Trinsoutrot-Gattin I., Visioli G., Rutgers M. (2019). Modeling of Soil Functions for Assessing Soil Quality: Soil Biodiversity and Habitat Provisioning. Frontiers in Environmental Science, 7, 113, DOI: 10.3389/fenvs.2019.00113.

Veerman C., Bastioli C., Biro B., Bouma J., Cienciala E., Emmett B., Frison E., Grand A., Filchev L.H., Pogrzeba M., Soussana J.-F., Vela C., Wittotowski E. (2020). Caring for soil is caring for life - Ensure 75% of soils are healthy by 2030 for food, people, nature and climate. Independent expert report. Report number: KI-02-20-673-EN-N. Eur. Comm. Publ. Office of the Eur. Union, Luxembourg. DOI: 10/2777/821504

Viscarra Rossel R.A., Behrens T., Ben-Dor E., Brown D.J., Demattê J.A.M., Shepherd K.D., Shi Z., Stenberg B., Stevens A., Adamchuk V., Aïchi H., Barthès B.G., Bartholomeus H.M., Bayer A.D., Bernoux M., Böttcher K., Brodský L., Du C.W., Chappell A., Fouad Y., Genot V., Gomez C., Grunwald S., Gubler A., Guerrero C., Hedley C.B., Knadel M., Morrás H.J.M., Nocita M., Ramirez-Lopez L., Roudier P., Campos E.M.R., Sanborn P., Sellitto V.M., Sudduth K.A., Rawlins B.G., Walter C., Winowiecki L.A., Hong S.Y., Ji W. (2016). A global spectral library to characterize the world's soil. Earth-Science Rev., 155, 198-230. DOI : 10.1016/j.earscirev.2016.01.012

Vitousek P.M., Naylor R., Crews T., David M.B., Drinkwater L.E., Holland E., Johnes P.J., Katzenberger J., Martinelli L.A., Matson P.A., Nziguheba G., Ojima D., Palm C.A., Robertson G.P., Sanchez P.A., Townsend A.R., Zhang F.S. (2009). Nutrient Imbalances in Agricultural Development. Science 324, 1519-1520. https://doi.org/10.1126/science.1170261

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. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00334