



HAL
open science

Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années

D. Arrouays, Pierre Stengel, Isabelle Feix, B. Lesaffre, Valéry Morard, Marion Bardy, Antonio Bispo, Bertrand Laroche, Thierry Caquet, Françoise Juille, et al.

► To cite this version:

D. Arrouays, Pierre Stengel, Isabelle Feix, B. Lesaffre, Valéry Morard, et al.. Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années. *Étude et Gestion des Sols*, 2022, 29, pp.365-379. hal-03815433

HAL Id: hal-03815433

<https://hal.inrae.fr/hal-03815433v1>

Submitted on 14 Oct 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

Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années

D. Arrouays^(1*), P. Stengel⁽²⁾, I. Feix⁽³⁾, B. Lesaffre⁽⁴⁾, V. Morard⁽⁵⁾, M. Bardy⁽⁶⁾, A. Bispo⁽¹⁾,
B. Laroche⁽¹⁾, T. Caquet⁽⁷⁾, F. Juille⁽⁷⁾, M. Rabut⁽⁷⁾, J.-F. Soussana⁽⁸⁾, M. Voltz⁽⁹⁾ et
C. Gascuel-Odoux^(7, 10)

- 1) INRAE, InfoSol, 45075, Orléans, France
- 2) Retraité – Ancien Directeur Scientifique Ecosystèmes Cultivés et Naturels de l'INRA, France
- 3) Ademe, experte nationale « sol », Direction Bioéconomie et Énergies Renouvelables, 49004 Angers, France
- 4) Membre de l'Académie d'Agriculture de France, ancien chef du service de la recherche du ministère chargé de l'environnement, France
- 5) Directeur adjoint de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 45100 Orléans, France, ancien co-président du GIS Sol
- 6) 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
- 7) INRAE, Collège de Direction, Direction Scientifique Environnement, 75338 Paris Cedex 07, membres des instances de gouvernance du GIS Sol et secrétariat du GIS Sol
- 8) INRAE, Vice-Président international, ancien Directeur Scientifique Environnement, 75338 Paris Cedex 07
- 9) UMR LISAH, Université de Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro 34000 Montpellier, France
- 10) UMR SAS, INRAE, Institut Agro, 35000 Rennes, France

* Auteur correspondant : dominique.arrouays@inrae.fr

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

ACTA : Association de coordination technique agricole

ADEME : Agence de la transition écologique (précédemment Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)

AFB : Agence française pour la biodiversité (2017-2019).

AFES : Association Française pour l'Étude du Sol

ANADEME : Collecte de données nationale sur les sols avant épandage de boues de stations d'épuration. Désormais appelée BDETM

AnaEE : Analyses et Expérimentations pour les Ecosystèmes

ANDRA : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

Arvalis : Arvalis - Institut du végétal : institut technique agricole français.

BDAT : Base de données d'analyses des terres

BDETM : Base de Données des teneurs en Eléments Traces Métalliques

BDSolU : Base de données des analyses de sols urbains

Comment citer cet article :

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. et Gascuel-Odoux C., 2022 -
Le GIS Sol, sa genèse et son évolution
au cours des vingt dernières années
Étude et Gestion des Sols, 29, 365-379

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-29/>

Comment consulter/télécharger
tous les articles de la revue EGS :

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

BioSoil : Projet de démonstration de faisabilité d'une surveillance harmonisée des sols forestiers d'Europe

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

CDD : Contrat à Durée Déterminée

CDTA : Carte Départementale des Terres Agricoles

CEE : Communauté Economique Européenne

CEES : Conservatoire Européen d'Echantillons de Sols

CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Cirad : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

Comifer : Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

COP : Conference of parties (Conférence des Parties : organe suprême de certaines conventions internationales)

CPCS : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols

ENSA : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie

DS : Direction Scientifique

ENSA : Ecole Nationale Supérieure Agronomique.

EPA : établissement public de l'État

FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)

GEMAS : Groupement d'Etudes Méthodologiques et d'Analyses des Sols

GESSOL : Programme de recherches « Fonctions environnementales et GESTion du patrimoine SOL »

GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique

GIS Sol : Groupement d'Intérêt Scientifique Sol

ICOS : Integrated Carbon Observation System ; Infrastructure internationale de recherche qui observe les flux des gaz à effet de serre.

IFEN : Institut Français de l'Environnement

IFN : Inventaire Forestier national

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

IRD : Institut de recherche pour le développement

IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

ISA : Institut Supérieur d'Agriculture

MNHN : Museum National d'Histoire Naturelle ; établissement d'enseignement, de recherche et de diffusion de la culture scientifique naturaliste

OFB : Office français de la biodiversité ; établissement public de l'État, résultant de la fusion (2020), de l'AFB et de l'Office national de la chasse et de la faune sauvage

OZCAR : Observatoires de la zone critique : Applications et recherche

OQS : Observatoire de la qualité des sols

PAC : Politique agricole commune de l'Union Européenne

PLU : Plan local d'urbanisme

PLUi : Plan local d'urbanisme intercommunal

RENECOFOR : REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers

RESF : Rapport sur l'état des sols de France (GIS Sol, 2011)

RMQS : Réseau de mesure de la qualité des sols

RMT : Réseau Mixte Technologique ; en agriculture, agroforesterie et sylviculture. Label et entité administrative, de partenariats associant recherche et développement, formation et gestion.

SCOT : Schéma de cohérence territoriale ; document d'urbanisme qui détermine un projet de territoire.

SDES : Service des données et études statistiques (SDES). Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires.

SESCPF : Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France

TGV : Train à Grande Vitesse.

ZAN : Objectif « Zéro Artificialisation Nette ». Le rythme net d'artificialisation des sols devra être divisé par deux chaque décennie, pour atteindre la neutralité en 2050.

RÉSUMÉ

Cet article retrace la genèse et l'évolution du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol), chargé de l'inventaire et de la surveillance des sols de France. Après avoir rappelé le rôle central des sols pour de multiples enjeux et l'importance de l'information sur les sols à toutes les échelles, nous retraçons l'histoire de la cartographie des sols en France, en la replaçant dans son contexte historique, politique et économique, ainsi que dans ses évolutions organisationnelles et technologiques. Nous montrons les progrès accomplis depuis le début des années 60, ainsi que les principales difficultés rencontrées. Nous expliquons comment cette dynamique a progressivement conduit à la création du GIS Sol, en développant la dimension temporelle, celle de la surveillance. Nous décrivons ensuite la création, les objectifs et la structure du GIS Sol, en charge de l'inventaire et de la surveillance des sols de France, puis nous montrons et expliquons les raisons de son élargissement progressif, la diversité grandissante de ses programmes et de leurs applications, de ses membres et de son partenariat.

Mots-clés

GIS Sol, sol, cartographie, surveillance, système d'information, France

SUMMARY

THE FRENCH SCIENTIFIC GROUP OF INTEREST ON SOIL (GIS SOL), ITS GENESIS AND EVOLUTION FOR 20 YEARS

This paper describes the genesis and the evolution of the French Scientific Group of Interest on Soil (GIS Sol), in charge of soil inventory and monitoring. It first recalls the central role of soils for multiple issues, their mapping and monitoring at all scales. Then it describes the history of French soil mapping, from the sixties until now. It shows the links between this history and contextual changes, among which public policies and the economical contexts. It describes changes in organizational, structural and technological dimensions, and demonstrates the progress accomplished since the 1960's as well as some difficulties encountered. Then, it explains how this history progressively led to the creation of the GIS Sol, the genesis, launching, objectives and organization of which are described. Finally, the main reasons of its progressive enlargement, the diversification of its objectives, and of its network of members and partners are discussed.

Key-words

GIS Sol, soils, mapping, monitoring, information system, France

RESUMEN

EL GIS SUELO, SU GÉNESIS Y SU EVOLUCIÓN EN LOS ÚLTIMOS VEINTE AÑOS

Este artículo describe la génesis y la evolución del Grupo de Interés Científico Suelo (GIS Sol), encargado del inventario y de la vigilancia de los suelos de Francia. Después de recordar el papel central de los suelos para múltiples retos y la importancia de la información sobre los suelos a todas las escalas, trazamos la historia de la cartografía de los suelos en Francia, situándola en su contexto histórico, político y económico, así como en su evolución organizativa y tecnológica. Mostramos los progresos realizados desde principios del decenio de 1960, así como las principales dificultades encontradas. Explicamos cómo esta dinámica condujo gradualmente a la creación del GIS Suelo, desarrollando la dimensión temporal, la de la vigilancia. A continuación describimos la creación, los objetivos y la estructura del GIS Suelo, encargado del inventario y de la vigilancia de los suelos de Francia, y luego mostramos y explicamos las razones de su ampliación progresiva, la creciente diversidad de sus programas y aplicaciones, sus miembros y sus asociaciones.

Palabras clave

GIS Sol, suelo, cartografía, vigilancia, sistema de información, Francia

INTRODUCTION

En position d'interface dans l'environnement, les sols sont au carrefour de grands enjeux planétaires tels que la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau (en quantité et en qualité), l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à ses conséquences, la santé humaine, l'approvisionnement en matériaux, le support pour les énergies renouvelables et la protection de la biodiversité et des écosystèmes (McBratney *et al.*, 2014). Véritables réacteurs bio-géo-chimiques, ils échangent en permanence des flux (d'eau, de gaz, de matière, d'énergie) avec la biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et l'anthroposphère. Ces flux sont au cœur de nombreux services écosystémiques (Adhikari et Hartemink, 2016; Eglin *et al.*, 2021) et sont mobilisés dans un bon nombre d'objectifs du développement durable (Bouma, 2014; Keesstra *et al.*, 2016). La gestion des sols est un enjeu multiscalaire, de l'échelle planétaire, à celle des pays, des régions, des unités de gestion (bassins-versants, fermes, massifs forestiers, plans locaux d'urbanisme, parcelles...), jusqu'aux échelles du profil de sol, des horizons, des agrégats, de la porosité et des constituants de la « pédosphère ».

La dynamique d'évolution des sols, la grande variabilité de leurs propriétés dans l'espace, la diversité de leurs usages et de leurs modes de gestion, leur complexité physique, chimique et biologique et les nombreuses menaces qui pèsent sur eux (Montanarella *et al.*, 2016) ont favorisé, en France comme dans le monde, une étroite association des pouvoirs publics, de la recherche et du développement, afin d'engager l'inventaire et la cartographie des sols et de mettre en œuvre leur surveillance.

En France, ces missions sont coordonnées depuis 20 ans par le GIS Sol (Groupement d'Intérêt Scientifique Sol; <https://www.gissol.fr/>), créé en 2001 et renouvelé depuis à 3 reprises par des conventions quinquennales. Le GIS Sol est co-présidé par les ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement, ce qui met clairement en évidence la mission de service public qui lui est confiée. Il vise l'acquisition, la capitalisation et la mise à disposition des données sur les sols de France, tant au plan de leur cartographie que du suivi de l'évolution de leurs propriétés.

Les utilisateurs visés par les produits du GIS Sol sont très divers : acteurs des politiques publiques, de la recherche, de l'enseignement et la formation, du monde de l'agriculture, de la forêt, de l'aménagement ou de la gestion des territoires, qui ont, ou peuvent avoir, besoin d'informations sur les sols. Une unité de service spécifique, InfoSol, a été créée à INRAE (l'INRA à l'époque) pour coordonner la mise en place des programmes du GIS Sol.

Cet article comprend trois parties : les prémisses du GIS Sol, notamment sur la cartographie des sols, la genèse et la mise en place du GIS, puis ses évolutions illustrées par quelques réussites marquantes.

LES INITIATIVES DE CONNAISSANCE DES SOLS QUI ONT PRÉFIGURÉ LE GIS SOL

Le GIS Sol n'est pas né de rien, mais bien de programmes opérationnels de connaissance des sols, pour certains en place de très longue date, et pour d'autres, éléments déclencheurs de sa mise en place.

Un long passé historique de cartographie des sols en France

L'histoire de la cartographie des sols en France peut être découpée schématiquement en plusieurs grandes phases correspondant chacune à des objectifs appliqués, politiques et/ou à des avancées technologiques. Nous retraçons brièvement ici leur évolution au cours des 60 dernières années.

Au début des années 1960, le défi était de nourrir la population croissante d'après-guerre et de produire suffisamment pour sa consommation alimentaire. Ce sont les premières années de la politique agricole commune (PAC) lancée en 1962. L'objectif était principalement de promouvoir la production agricole, de développer de nouvelles zones agricoles et de viser des rendements maximaux. C'est l'époque du développement des grandes compagnies d'aménagement du territoire, notamment engagées dans de nombreuses activités de cartographie des sols incluant des objectifs comme le remembrement, la conquête de nouvelles terres agricoles, leur mise en valeur par le drainage, le chaulage, l'irrigation, la fertilisation (voir par exemple l'historique *in* Legros, 1996) ou la déforestation (par exemple, dans les Landes de Gascogne). Cette tendance s'est amplifiée, tant par l'évolution technologique (mécanisation, utilisation d'engrais et de pesticides de synthèse, progrès de la sélection variétale) que par les conséquences de certains conflits (nécessité de nouvelles terres arables en raison du retour massif d'Algérie de colons français agriculteurs; Journal officiel de la République française, 1961). Cette période était clairement axée sur un seul service écosystémique du sol : la production alimentaire. Ces opérations de cartographie des sols n'étaient cependant pas encore coordonnées nationalement, ni capitalisées.

A la fin des années 1960, les premiers manuels détaillés apparaissent, comme « Bases et techniques d'une cartographie des sols » (Jamagne, 1967) et les ouvrages collectifs de la commission des sciences du sol et de la classification des sols (CPCS, 1967). Ces efforts d'harmonisation ont abouti à la création du premier service national de cartographie pédologique de France (Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France - SESCPF) à l'INRA en 1968. Doté d'un important soutien financier récurrent par le Ministère chargé de l'agriculture, son objectif principal était de coordonner un ambitieux programme de cartographie pédologique à l'échelle du 1/100 000.

Vers les années 1980, l'espace est devenu progressivement contraint en raison de l'urbanisation et du développement des infrastructures. Deux nouveaux défis sont apparus : gérer l'espace et préserver les sols les plus productifs. Un nouveau programme « Carte Départementale des Terres Agricoles » (CDTA, Loi n° 80-502 d'Orientation Agricole du 4 juillet 1980, article 73 ; Jamagne *et al.*, 1989) a vu le jour sous l'impulsion du ministère chargé de l'agriculture, tandis que de vastes opérations d'aménagement des sols agricoles ont conduit à la cartographie de secteurs de référence (Hervé et Urbano, 1987 ; Favrot et Lagacherie, 1989) pour le drainage et la mise en valeur des terres. Le programme CDTA n'a pas abouti à une connaissance harmonisée des sols de la France, non seulement à cause du manque de financement, mais avant tout parce qu'il s'agissait d'un mélange de cartographie des sols et de la « valeur économique » des terres. La confusion d'objectifs et le manque de directives claires sur la façon de produire ces cartes ont entraîné de grandes disparités entre les cartes et des discussions interminables sur leur utilisation. Ce programme est abrogé en 1992 par la loi N° 92-1283.

Les opérations « Secteurs de Référence » se sont néanmoins poursuivies tout en diversifiant leurs objectifs au-delà du seul drainage (irrigation, viticulture, aires de captages, fertilisation...) et le programme « Carte Pédologique de France à 1/100 000 » s'est poursuivi également. Dans le même temps, des régions et des départements, avec l'appui du SESCPF, ont également mis en place ou poursuivi des programmes de cartographie des sols au 1/50 000 ou au 1/25 000 (Région Centre, Vienne, Aube, Aisne).

Au début des années 1990, deux faits majeurs ont conduit à restructurer la cartographie des sols en France :

- il est devenu évident que le programme de cartographie au 1/100 000 avançait trop lentement pour couvrir dans un temps raisonnable la totalité du territoire ;
- l'apparition des Systèmes d'Information Géographique et le développement des bases de données associées permettaient d'envisager une capitalisation collective des données sur les sols.

Une étape clé fut alors de reformuler une stratégie de cartographie des sols, de manière opérationnelle, à même de couvrir, à une échéance raisonnable, l'ensemble du territoire national et de collecter toutes les informations dans une base de données centralisée. C'est ainsi qu'en 1991 a été lancé le programme IGCS, « Inventaire, gestion et conservation des sols » (Bornand *et al.*, 1989 ; Favrot *et al.*, 1994 ; King *et al.*, 1999), dont les objectifs principaux étaient les suivants :

- cartographier les sols de France à l'échelle du 1/250 000 ;
- capitaliser l'ensemble des données au sein d'une base de données unique « DoneSol » ;
- poursuivre les actions de type « Secteurs de référence » ;
- privilégier les cartographies à moyenne échelle (1/50 000 à 1/100 000) dans les territoires les moins bien connus.

Ce programme, lancé à l'initiative du ministère chargé de l'agriculture et d'INRAE (alors l'INRA), était principalement financé par le ministère, des collectivités territoriales, parfois l'Europe, des agences de l'eau et des financements propres à l'INRA. La mise en place de ce programme, qui reste l'un des programmes phare du GIS Sol, s'est accompagnée de la création d'un conseil scientifique propre à ce programme qui poursuit toujours ses activités. La coordination de la mise en place de ce programme a naturellement été confiée à l'INRA. Ce programme a permis par ailleurs de développer et d'entretenir un large réseau de collaborations avec divers partenaires professionnels (*e.g.*, Laroche *et al.*, 2014 ; Richer-de-Forges *et al.*, 2014), qui a été un facteur essentiel des succès du GIS Sol. Les partenaires professionnels ont été soit des acteurs directs de l'acquisition des données sur le terrain (Chambres d'Agricultures, Bureaux d'Etudes, organismes forestiers, laboratoires), soit des partenaires très divers, commanditaires ou utilisateurs d'études (collectivités territoriales, agglomérations, entreprises engagées dans l'aménagement du territoire, impliquées dans le machinisme agricole, gestionnaires de territoires ou de bassins-versants, entreprises impliquées dans la gestion des déchets et dans l'épuration des eaux...).

L'émergence d'initiatives de suivi de l'évolution des propriétés des sols

Des équipes de recherche ont pris des initiatives pour capitaliser les données d'analyses de sol issues des laboratoires français d'analyse de terre, afin de constituer une base de données contribuant à l'inventaire et à la surveillance des sols. Les prémisses datent de 1985, à l'initiative de l'ENSA de Rennes (aujourd'hui Institut Agro – site de Rennes) et se sont ensuite développées sur l'ensemble du territoire avec l'appui de l'AFES et du ministère en charge de l'agriculture. La base de données d'analyses des terres (BDAT) a été constituée et a permis de produire une première capitalisation et valorisation des données acquises à la demande des agriculteurs sur la période 1990-1995, associant les compétences de l'ENSA de Rennes et l'ISA de Lille (Schvartz *et al.*, 1997 ; Walter *et al.*, 1997). En 1997, partant d'une idée similaire et à l'initiative de l'Ademe, les données d'analyse de sols faites dans le cadre de l'épandage de boues de station d'épuration ont été rassemblées et ont permis la création d'une base de données, initialement dénommée ANADEME, puis renommée BDETM, qui capitalise les données de teneurs en éléments traces métalliques acquises préalablement à ces épandages, et dont les travaux se poursuivent toujours (Baize *et al.*, 2006, 2011 ; Duigou et Baize, 2010 ; Duigou *et al.*, 2011).

Dans la même période, le ministère chargé de l'environnement a initié le programme « observatoire de la qualité des sols » (OQS ; Martin *et al.*, 1999), afin de pouvoir suivre sur des sites pérennes l'évolution de la qualité des sols.

Toutes ces initiatives (IGCS, BDAT, BDETM, OQS) favorisent alors la mise en place de réseaux d'acteurs autour des sols, l'élaboration d'outils d'archivage, d'analyse et de diffusion des données.

2. LA GENÈSE DU GIS SOL

Les évènements qui ont préfiguré la création du GIS Sol

Le contexte environnemental et politique, sa conjonction avec la recherche

Si beaucoup de programmes étaient en place, l'idée de les fédérer et de mettre en place une structure de coordination n'est arrivée que progressivement. Les années 90 ont été marquées par une intense activité sur les sols.

Du côté des politiques publiques, les directives européenne Eau (2000/60/CE) et Déchets (2008/98/CE) se sont mises en place, et ont questionné les sols dans leurs fonctions de régulation de la quantité et de la qualité de l'eau et dans la préservation de la qualité des sols eux-mêmes, sans qu'une stratégie de leur surveillance ne soit encore engagée à l'échelle européenne sur ces questions. Les acteurs des politiques publiques ont alors pris conscience du manque de données pour l'étayer et de l'importance d'anticiper la mise en place d'une possible stratégie européenne sur les sols, ou pour le moins d'accompagner le volet « sol » de ces deux directives européennes. D'autres politiques publiques, notamment sur le climat, ont également été fragilisées par le manque de données sur les sols. A titre d'exemple, le manque de données sur le rôle du carbone des sols a été un des facteurs ayant contribué à l'échec de la COP 6 de La Haye (1996). Parallèlement, l'Institut Français de l'Environnement (Ifen) a été créé en 1991 pour stimuler et structurer la surveillance de l'environnement, dont le sol est une composante majeure. Les acteurs des politiques publiques, notamment environnementales, ont pris conscience de l'importance de mettre en place une stratégie de connaissance et de suivi de l'ensemble des sols, alors que les sols notoirement pollués étaient déjà pris en charge par le ministère chargé de l'environnement et par l'Ademe. D'autres initiatives européennes et françaises se sont développées, afin de couvrir les problématiques du dépérissement des forêts sous l'effet des « pluies acides » (CEE, 1987 ; Barthod, 1994 ; Ulrich, 1995). Elles comprenaient également un volet de caractérisation des sols sur des placettes de suivi, préfigurant les placettes du réseau RENECOFOR (Ulrich, 1995 ; Ponette *et al.*, 1997).

Du côté de la recherche, en particulier à l'INRA, les années 90 se sont caractérisées par une montée en puissance des problématiques environnementales, incluant le sol, l'eau, l'air,

et des enjeux alimentaires, dont la qualité et l'innocuité des produits agricoles. L'institut, qui portait à cette période une expertise importante et spécifique sur les sols et l'émergence de problématiques environnementales (changement climatique et Protocole de Kyoto, Directives européennes eau et déchets...), a placé les sols comme un compartiment incontournable de l'environnement, au cœur de la compréhension des grands cycles bio-géochimiques.

Le constat d'un échec relatif

Malgré tous ces efforts, à la fin des années 1990, le rapport produit par Bornand (1997) a fait le constat que 80 % des études pédologiques étaient « perdues », voire refaites au même endroit. Le coût de la perte globale de cette information sur les 30 années précédentes a été estimé à 700 millions de francs (environ 100 M€). Il est apparu urgent de mieux s'organiser afin de « thésauriser » les données sur les sols au sein d'une base nationale. Une telle base nationale existait (Gaultier *et al.*, 1993), mais force est de reconnaître qu'elle n'était que très peu alimentée. Certes, la cartographie des sols de France avait été réorganisée au travers du programme IGCS, mais à la fin des années 1990 à peine un quart du territoire était concerné par des cartographies au 1/250 000 et moins de 10 % de la surface de la France métropolitaine était couvert par la base de données géographiques DoneSol (King *et al.*, 1999).

A l'exception de la BDAT et de quelques sites instrumentés, la surveillance systématique des sols était quasi inexistante. Le programme OQS ne comptait que 11 sites (Martin *et al.*, 1999). Les moyens mis à disposition de ce programme ne permettaient pas d'envisager une couverture représentative de l'état des sols de France et la valorisation de l'OQS se limitait à quelques travaux méthodologiques et statistiques (Wopereis *et al.*, 1988 ; Arrouays *et al.*, 2000) et à quelques résultats sur des sites ayant fait l'objet de suivis dédiés (voir par exemple Bonneau *et al.*, 2000). La stratégie d'implantation des sites de l'OQS n'était pas claire : elle relevait d'un compromis entre le suivi de certaines dégradations présumées de la qualité des sols et l'opportunité de trouver des sites et des équipes sur place. De fait, l'OQS aurait pu permettre un suivi diachronique très fin de certaines évolutions en mesurant le mieux possible tous les intrants et enregistrant les pratiques agricoles, ce qui a été fait bien plus tard dans un cadre de recherche, celui des infrastructures de recherches (parcelle, bassin versant), comme dans AnaEE (<https://www.anaee-france.fr/>) ou OZCAR (<https://www.ozcar-ri.org/fr/ozcar-observatoires-de-la-zone-critique-applications-et-recherche/>). Force est de reconnaître que cet objectif n'a été à l'époque que très partiellement atteint à quelques exceptions notables (e.g., Bonneau *et al.*, 2000 ; Legros *et al.*, 2002). Visant à l'origine l'implantation de 50 à 100 sites, l'OQS n'a pas atteint ses objectifs, mais il a constitué un incubateur méthodologique pour l'observation de la qualité des sols. Parallèlement, une analyse comparative à l'échelle européenne menée par le

Centre Thématique sur les Sols de l'Agence Européenne de l'Environnement pointait le retard considérable de la France, tant en matière de cartographie que de surveillance systématique des sols (Arrouays *et al.*, 1998). Cette situation critique était paradoxale, dans la mesure où l'INRA était dans le même temps chargé de la coordination de programmes européens de constitution de bases de données sur les sols (Jamagne *et al.*, 1995) et portait de très nombreux programmes de recherche axés sur les fonctions environnementales des sols et leurs liens avec d'autres composantes du milieu (eaux superficielles et souterraines, air, biosphère).

Les prémisses du GIS Sol

En 1998, a lieu, en France, à Montpellier, le congrès mondial des sols, qui a contribué à franchir une étape clé dans l'élaboration d'une stratégie de connaissance et surveillance des sols pour la France. Dans cette dynamique, il faut souligner le rôle qu'a tenu l'AFES : au-delà de la tenue du congrès mondial des sols en France, comme rendez-vous stratégique, elle a su renforcer les liens entre les divers acteurs travaillant sur les sols et mettre en place une politique de communication très efficace vis-à-vis des pouvoirs publics et des médias.

Cette dynamique a aussi été permise par une conjonction d'acteurs, dans les ministères, à l'Ademe, l'Ifen et l'INRA, agissant de concert et en bonne intelligence collective sur les sols, attentifs à bien séparer et articuler l'observation et la recherche : d'une part, la mise en place du programme de recherche « Fonctions environnementales et GESTION du patrimoine SOL » (GESSOL), lancé par le ministère chargé de l'environnement et fortement appuyé par l'Ademe, qui s'est achevé en 2016 après avoir financé 46 projets de recherche et contribué à structurer et consolider une communauté scientifique pluridisciplinaire dans ce domaine (pour une revue à mi-parcours voir Bernoux *et al.*, 2011 ; pour des ouvrages complets voir Citeau *et al.*, 2008 et Bispo *et al.*, 2016) ; d'autre part, la nécessité de mettre en place de manière opérationnelle une cartographie harmonisée et une surveillance systématique.

En 1998, à l'initiative du ministère chargé de l'environnement (service de la recherche) et de l'INRA, un groupe de réflexion a été constitué entre les principales institutions chargées de la surveillance et de la cartographie des sols ou potentiellement intéressées à l'utilisation et à la diffusion de leurs résultats : outre ces initiateurs, il a réuni le ministère chargé de l'agriculture (Bureau de l'agriculture, des ressources naturelles et des sols), l'Ademe et l'Ifen. En 1999, l'idée de créer un Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) maillant l'ensemble du territoire s'est imposée progressivement (Thorette et Arrouays, 1999), afin d'avoir une image complète et fine de l'évolution des sols du territoire, potentiellement cartographiable, associant aux sols ses usages, les régimes climatiques et les substrats géologiques (Arrouays *et al.*, 2001).

Le GIS Sol a ainsi pu, à sa création, d'une part, capitaliser

sur toutes les initiatives de connaissance des sols à vocation opérationnelle à l'œuvre citées précédemment, et d'autre part, engager un nouveau programme, le RMQS (Arrouays *et al.*, 2002) qui fait actuellement l'objet du numéro spécial d'Etude et Gestion des Sols (Jolivet et Chabrit (eds), en cours d'édition).

À partir d'un état des lieux présenté par l'INRA, trois enjeux majeurs ont été partagés :

- (i) contribuer à une meilleure organisation de l'appui aux politiques publiques nationales sur les sols ;
- (ii) mieux coordonner les actions des différents partenaires dans une structure permettant une meilleure lisibilité et stabilité, et une meilleure mutualisation des efforts ;
- (iii) mettre en place un véritable dispositif de surveillance des sols de France, représentatif des sols et de leurs occupations, permettant de réaliser un bilan de leur état afin de constituer une référence pour un suivi pérenne de leurs évolutions.

Le premier point a conduit, le 10 février 2000, à la signature, entre la ministre chargée de l'environnement et le président de l'INRA, d'une convention cadre dans laquelle le suivi de la qualité des sols était la première priorité (Voynet et Hervieu, 2000). Le second a abouti à la constitution du Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) en 2001, réunissant les partenaires cités *supra* et doté d'une gouvernance propre. Le lancement du GIS Sol a été concomitant d'un souhait du Ministère chargé de l'environnement de structurer la surveillance de l'environnement, par des observatoires thématiques, « opérationnels » ou « de recherche » selon les sujets et le panorama des acteurs (cf. Rapport de l'Inspection générale de l'environnement de décembre 2001) ; le GIS Sol a bénéficié de cette dynamique. La structure choisie, celle du Groupement d'Intérêt Scientifique, était inédite – et le reste encore aujourd'hui dans le panorama des observatoires de l'environnement ; elle a permis l'adaptation aux attentes des ministères, malgré des difficultés parfois imprévisibles (disparition de l'Ifen, risque de désengagement de certains partenaires financiers, aléas budgétaires annuels, etc.). La constitution du GIS a été facilitée par les outils de coordination préalablement mis en place, comme ceux des programmes IGCS, BDAT, BD-ETM et GESSOL. Le troisième point a conduit à la mise en place du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS), comme un nouveau programme du jeune GIS Sol. Le GIS Sol a permis d'anticiper le besoin d'une surveillance des sols, recommandée ensuite par la « Communication de la commission au conseil, au Parlement européen, au comité économique et social et au comité des régions « *Vers une stratégie thématique pour la protection des sols* » » - du 16.04.2002.

Le GIS Sol, structure fédérant des partenaires et coordonnant des programmes

Le GIS Sol présente dès sa création trois composantes : des membres, qui apportent des moyens humains et financiers,

élaborent et, pour partie, mettent en œuvre sa stratégie; des partenaires en régions, experts des sols, appartenant à des structures diverses (enseignement, chambre d'agriculture, bureau d'étude...) qui contribuent à mettre en œuvre les programmes du GIS, parfois sous forme de prestation, parfois en apportant eux-mêmes des moyens, peu ou prou issus des régions; au centre, l'unité de service INRAE InfoSol, qui constitue l'entité opérationnelle assurant la coordination de cet ensemble, en particulier le lien aux partenaires régionaux.

Deux instances de gouvernance assurent le bon fonctionnement du GIS Sol (Figure 1): d'une part, un haut comité de groupement qui réunit deux à trois fois par an les membres du GIS et définit des objectifs stratégiques, et d'autre part, un secrétariat permanent qui réunit entre 4 et 10 fois par an les membres du GIS, et agit à un niveau plus opérationnel. Le programme ICGS est, quant à lui, appuyé par un Conseil Scientifique spécifique.

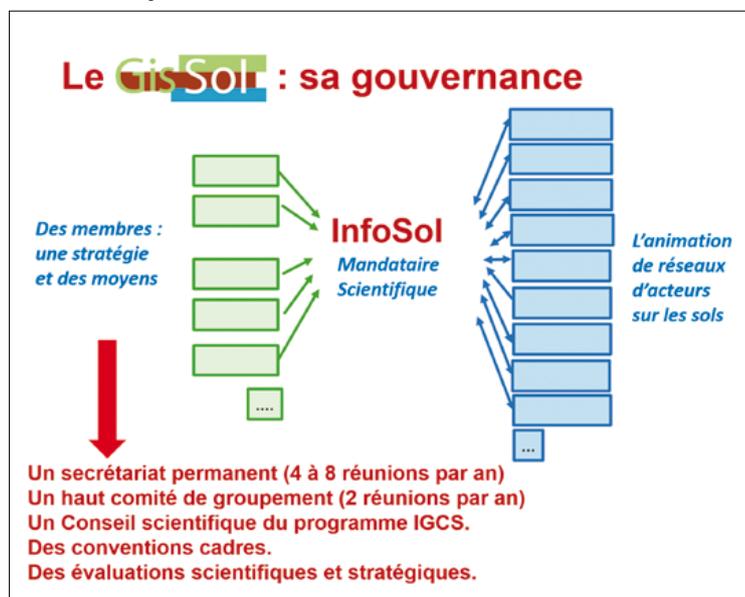
Bien que certaines évaluations stratégiques (voir liens à la fin de cette section) aient généré des questionnements sur le modèle économique et l'absence de conseil scientifique spécifique à l'ensemble du GIS, la structure souple propre aux GIS n'a jamais été remise en cause, car agile et utile, répondant bien aux besoins des politiques publiques et des acteurs, par une mise en réseau de ceux-ci pour produire des données sur les sols. Le GIS Sol fédère des collectifs, tant dans les communautés des politiques publiques (ministères, agences, collectivités territoriales), de la recherche (organismes de recherche et d'enseignement), du développement agricole (Chambres d'Agriculture, coopératives...) que chez les pédologues (partenaires du GIS). Ces collectifs sont animés par des réunions à fréquence très régulière et adaptée à chaque instance, nécessaires à ces actions de grande envergure spatiale et temporelle, et au grand nombre de personnes impliquées. C'est une instance originale, par rapport à ce qui a été mis en place dans d'autres pays européens, où les missions du GIS Sol ont plus souvent été confiées à telle ou telle institution, sans qu'une gouvernance large, incluant recherche, politiques publiques, acteurs locaux et opérationnalisation n'ait été mise

en place. Dans d'autres pays européens (e.g. Allemagne, Espagne, Italie), la gestion politique à l'échelle régionale a pu constituer une entrave supplémentaire à la mise en place d'une gouvernance nationale sur l'inventaire et la surveillance des sols.

Cette structure présente cependant des fragilités par plusieurs aspects. Les nécessaires conventions pour le fonctionnement des programmes sont extrêmement nombreuses, souvent annuelles en lien avec l'annualité des financements, avec une multitude d'entités, membres ou partenaires du GIS. L'annualité budgétaire des programmes, comme les aléas financiers dont certains membres souffrent, a rendu certaines situations difficiles. Dans l'ensemble, la mutualisation et la volonté commune des membres ont permis de dépasser ces difficultés afin de trouver des solutions pour maintenir les programmes durant 20 ans. Le budget de fonctionnement du GIS Sol est important, d'environ 1,8 million d'euros par an, géré par l'unité InfoSol, mais reste modéré au regard des budgets positionnés sur d'autres politiques. A titre de comparaison, le budget annuel du GIS Sol ne représente que 300 m d'autoroute, ou 100 m de ligne LGV; la surveillance demandée par la directive cadre sur l'eau représente un budget annuel environ 5 fois plus élevé pour le seul bassin Loire-Bretagne, qui couvre 28 % de la surface métropolitaine. Autre exemple, les seuls programmes d'inventaires nationaux au sein du système d'information sur la biodiversité, qui ne représentent d'1/5^e du budget dédié à la connaissance dans ce cadre, consomment 22 M€/an (voir par exemple, SDES, 2021 et <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/depenses-de-protection-de-l'environnement-synthese-des-connaissances-en-2021>). Dans un tout autre domaine, le système réglementaire de mesures, contrôles, et analyses vis-à-vis du bruit pèse en moyenne 25 M€/an. Malgré l'investissement important consenti par l'INRA dans la création d'InfoSol, par l'affectation de moyens humains permanents pour coordonner et contribuer à mettre en œuvre les programmes du GIS Sol, seulement 30 personnes permanentes travaillent actuellement à InfoSol. L'unité est ainsi contrainte d'embaucher entre 15 et 20 CDD par an, ceci représentant au total plus de 350 CDD sur 20 ans, avec ce que cela implique en termes d'efforts de formation et d'accompagnement à

Figure 1 : La gouvernance du GIS Sol

Figure 1: The governance of the GIS Sol



l'insertion dans InfoSol comme dans la vie professionnelle ensuite, de risques de pérennité des compétences. Il s'agit donc d'une structure agile mais fragile par la forte rotation des moyens humains et la complexité de la gestion financière.

L'activité et le financement du GIS Sol sont définis dans une convention cadre d'une durée de cinq ans. Le GIS Sol a connu trois conventions successives, ce qui est assez exceptionnel pour un GIS. Son évaluation comprend deux volets, l'un scientifique, sur la base d'une lettre de mission rédigée par INRAE et d'un rapport d'un comité scientifique constitué en accord entre INRAE et les autres membres du GIS, l'autre stratégique, par les inspections générales des ministères en charge respectivement de l'agriculture et de l'environnement. Ces évaluations ont notamment contribué à la construction progressive de la stratégie d'élaboration d'un système d'information sur les sols et à l'élargissement progressif du partenariat du GIS (voir par exemple pour 2011 : <https://www.vie-publique.fr/rapport/32189-evaluation-du-groupe-d-interet-scientifique-gis-sol>; et pour 2017 : <https://agriculture.gouv.fr/rapport-sur-levaluation-du-groupe-d-interet-scientifique-gis-sol>).

LES ÉVOLUTIONS DU GIS SOL

Des membres initiaux à aujourd'hui

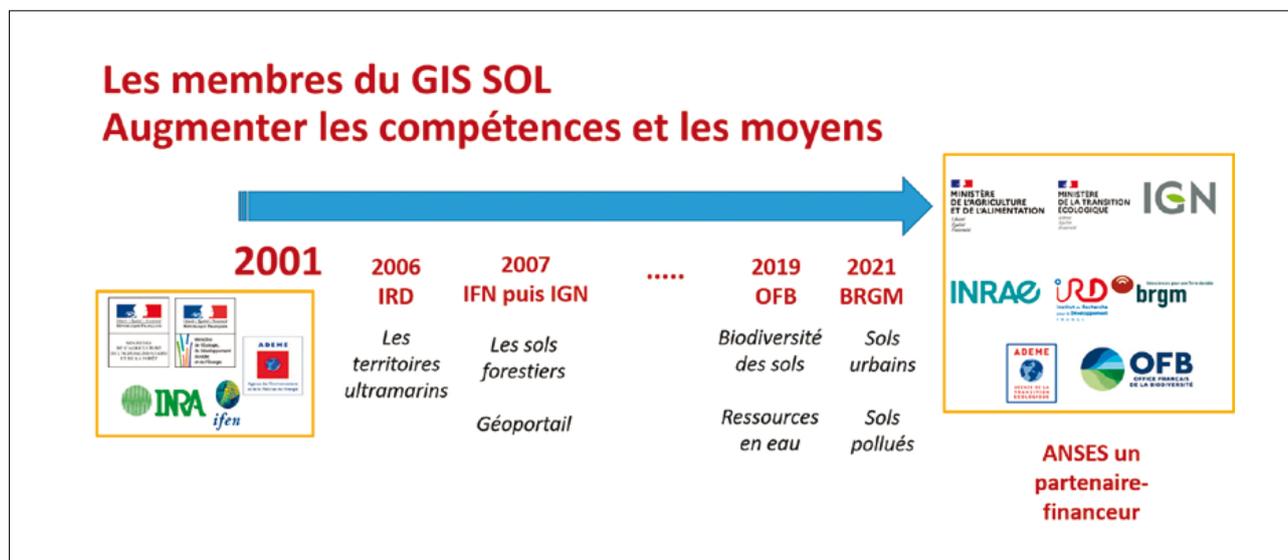
Aux membres fondateurs, les ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement, l'Ifen, qui était alors un établissement public administratif, l'Ademe et INRAE, alors

l'INRA, se sont joints, en 20 années, cinq nouveaux membres (Figure 2), permettant de couvrir une diversité de territoires et d'usages des sols et de mettre en commun les compétences françaises sur l'acquisition des données sur le sol. En 2006, l'IRD rejoint le GIS Sol, prenant en charge le déploiement des programmes sur les territoires d'outre-mer. Son intégration était logique, dans la mesure où il avait conduit la plupart des travaux de cartographie des sols dans ces territoires. En 2007, l'inventaire forestier national (IFN), qui a depuis fusionné avec l'Institut géographique national (IGN), devenu Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), a intégré le GIS Sol. Il a progressivement contribué à enrichir les données sur les sols forestiers, en partie grâce au programme BioSoil financé par l'Union Européenne (Lacarcé *et al.*, 2009). Notons également que l'intégration des données sur les sols forestiers a considérablement enrichi la base nationale et fait aujourd'hui l'objet de programmes de valorisation spécifiques (voir par exemple, Eymard, 2022). Certaines données sont accessibles et le seront de plus en plus, par le géoportail de l'IGN (<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>), donnant une lisibilité aux données sur les sols pour le grand public (voir, par exemple, Messant *et al.*, 2021).

Une période de stabilité des membres a suivi durant 10 ans (le Commissariat général au développement durable se substituant à l'Ifen, disparu en 2008). En 2019, l'Office français de la biodiversité (OFB, à l'époque AFB) a adhéré au GIS Sol, en particulier pour amplifier l'acquisition des données sur l'eau (réservoir utilisable en eau des sols) et sur la biodiversité des sols (du compartiment microbien à toutes les composantes de la biodiversité). En 2021, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) a rejoint le GIS Sol, en particulier pour

Figure 2 : L'évolution des membres et des partenaires financeurs du GIS Sol

Figure 2: Evolution of members and financial partners of the GIS Sol



y apporter des données sur les sols pollués et sur les sols urbains. La contribution du BRGM aux travaux sur les sols était déjà opérationnelle sur plusieurs plans, par exemple sur la cartographie du fond pédo-géochimique en contaminants métalliques (Villanneau *et al.*, 2008), la cartographie des aléas d'érosion des sols (Cerdan *et al.*, 2006), l'utilisation de données de gammamétrie aéroportées (Laroche *et al.*, 2013; Martelet *et al.*, 2013; Loiseau *et al.*, 2020), la cartographie lithologique (Loiseau *et al.*, 2020), ou la télédétection (Arrouays *et al.*, 1996).

Les partenaires et leur évolution au cours des vingt dernières années.

Le GIS Sol travaille avec des partenaires qui peuvent être différents selon les programmes. Il a hérité une longue tradition de collaborations avec les Chambres d'Agriculture, avec les établissements d'enseignement supérieur agricole, les collectivités territoriales, les agences de bassin et la communauté des chercheurs en science du sol de nombreux organismes (Cirad, CNRS, INRAE, IRD, Universités...). Il est aussi amené à collaborer avec d'autres agences, par exemple l'ANSES pour intégrer une dimension sanitaire, ou l'ANDRA, ou divers instituts et associations (Ineris, Arvalis, Comifer, GEMAS, IRSN, CEREMA...). Le GIS bénéficie d'une collaboration étroite avec le réseau des laboratoires d'analyses de terres agréés avec qui il collabore étroitement, notamment dans le cadre du programme BDAT.

Le GIS Sol travaille étroitement avec le Réseau Mixte Technologique (RMT) Sols et Territoires (<https://sols-et-territoires.org/>), créé en 2010, animé par des chambres d'agriculture, des établissements d'enseignement supérieur agricole, l'unité InfoSol et l'ACTA, fédérant de nombreux acteurs du sol. Le RMT produit des outils facilitant la diffusion et l'appropriation des données du GIS Sol auprès des acteurs, principalement du monde agricole à son démarrage, aujourd'hui d'une très grande diversité (collectivités territoriales, agglomérations, structures de gestion de bassins-versants, établissements d'enseignement, associations...).

Ces échanges et collaborations avec des réseaux et diverses organisations sont nécessaires pour coordonner les travaux et développer des synergies, mais ils permettent également au GIS Sol d'identifier les besoins à venir, concernant par exemple l'élaboration de nouveaux paramètres et indicateurs.

Les programmes du GIS Sol et leurs évolutions

Cinq programmes d'acquisition de données sur le sol, en France métropolitaine et ultramarine, structurent aujourd'hui l'activité du GIS Sol.

1) Le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), un réseau de 2 240 sites, répartis sur une grille de 16 x 16 km,

ré-échantillonnés approximativement tous les 15 ans (Jolivet *et al.*, 2006, 2018; Jolivet et Chabrit, en cours d'édition), et dont l'ensemble des échantillons sont conservés, afin de compléter les propriétés mesurées, selon les besoins et les avancées méthodologiques (*cf.* le numéro spécial 20 ans du RMQS d'Etude et Gestion des Sols édité par Jolivet et Chabrit (en cours d'édition) et Ratié *et al.* (2010).

- 2) L'Inventaire gestion et conservation des sols (IGCS), programme de cartographie multi-échelle des sols, qui s'est fortement engagé dans la cartographie des sols au 1/250 000 (Laroche *et al.*, 2014), mais qui soutient également des programmes de cartographie à moyenne échelle (1/100 000 et 1/50 000; Richer-de-Forges *et al.*, 2014) et des secteurs de référence. L'IGCS soutient aussi des contributions méthodologiques aux applications des données sols à des thématiques variées (Richer-de-Forges *et al.*, 2019) et la mise au point de méthodes et de transfert de la cartographie des sols par modélisation statistique (Voltz *et al.*, 2020).
- 3) La base de données des analyses de terre (BDAT), née d'un partenariat avec les laboratoires d'analyses de terre, capitalise l'ensemble des analyses de sols faites par les laboratoires agréés qui en acceptent le principe, et diffuse des informations statistiques agrégées sur 5 ans à diverses échelles spatiales (cantons, petites régions agricoles, départements, régions, France métropolitaine...; *e.g.* Saby *et al.*, 2014, 2017).
- 4) La base de données éléments traces métalliques (BDETM), qui capitalise l'ensemble des analyses de sols demandées dans les plans d'épandage (boues urbaines, effluents et déchets industriels...; *e.g.* Baize *et al.*, 2006, 2011)
- 5) La base de données des analyses de sols urbains (BDSolU), intégrée en 2021 avec l'arrivée du BRGM, en vue de déterminer des valeurs de fond pour appuyer le diagnostic de sites potentiellement contaminés et la valorisation des terres excavées. Son utilité ne s'arrête pas aux frontières des sols urbains qui sont par essence variables dans le temps et dans l'espace. Il permet, en complémentarité avec la base de données DoneSol, une véritable continuité des espaces urbains, péri-urbains, agricoles et semi naturels vers laquelle il convient de tendre. Il s'agit ici autant d'un enjeu de gestion des sols que de gestion et de planification de leurs usages et de leurs services écosystémiques.

Un système d'information est associé à ces programmes. Ceux-ci structurent une production de données sur les sols qui sont archivées dans différentes bases de données qui leur sont spécifiques, qui proviennent, soit directement de données d'observation et d'analyses issues du terrain (RMQS, IGCS et BDSolU), soit de données collectées par des partenaires et reversées, traitées, archivées (BDAT, BDETM). Toute une chaîne d'analyse des données a été mise en place, qui part d'échantillons de sol prélevés sur le terrain, de données collectées par différents programmes, pour aller vers des outils

d'extraction et de diffusion de données, brutes ou retravaillées, sous différents formats. Un système d'information décisionnel permet d'associer plusieurs bases de données, ou différents modèles assemblant ces données, selon les besoins. Un renouvellement permanent de ces outils est opéré, aidé en cela par la direction des systèmes d'information d'INRAE. Un article dédié devrait être soumis dans ce numéro spécial.

Le GIS Sol dans l'environnement européen et mondial

Dès 2008, une revue des réseaux de surveillance des sols en Europe (Morvan *et al.*, 2008) a montré la forte disparité des réseaux de surveillance des sols entre les états membres de l'Union Européenne, voire au sein même de ces états. Une actualisation de cette revue est en cours dans le cadre du programme européen EJP6 « Supporting harmonised soil information and reporting » et des propositions pour des méthodes d'harmonisation sont en cours d'élaboration. Il s'agit en particulier de rendre comparables les réseaux nationaux entre eux, mais également d'élaborer des propositions pour rendre compatibles et inter-opérables 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). D'une façon générale, la situation, tant en matière de cartographie traditionnelle et numérique que d'établissements de réseaux de surveillance s'est améliorée dans la plupart des pays européens, ainsi qu'à l'échelle de l'Europe entière avec la mise en place de LUCAS-Soil. Il n'en reste pas moins que de fortes disparités (échantillonnage spatial, vertical et temporel; variables mesurées et techniques de mesure; disponibilité des données...), subsistent encore (Bispo *et al.*, 2021; Bispo *et al.*, 2022). L'un des objectifs du programme EJP6 est de tester des méthodes d'intégration et d'harmonisation, et d'élaborer différents scénarii permettant une meilleure valorisation conjointe de toutes ces données., afin de préparer le déploiement de l'EU SO (European Soil Observatory) (Maréchal *et al.*, 2022).

Au plan mondial, les programmes nationaux de constitution de systèmes d'information sur les sols sont également très hétérogènes et leur développement est considéré comme une priorité tant au niveau global (Montanarella *et al.*, 2016), qu'au niveau des pays eux-mêmes (Arrouays *et al.*, 2017, 2021; Arrouays et Dawson, 2022). Pour les cartes prédictives, on distingue parfois schématiquement des approches dites « bottom-up » (prédictions allant des pays vers un continent ou le globe, (Arrouays *et al.*, 2014)) de produits dits « top-down » (prédictions à partir de données et à des échelles continentales ou globales; e.g., Ballabio *et al.*, 2016 pour l'Union Européenne; Poggio *et al.*, 2021 pour le globe).

Il ne fait aujourd'hui aucun doute que ces produits sont complémentaires (e.g. Caubet *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020;

Arrouays *et al.*, 2020, 2021), de même que des prédictions sur des surfaces plus réduites sont aussi nécessaires (e.g. Lemerrier *et al.*, 2022; Richer-de-Forges *et al.*, 2022), chaque étendue de territoire observée étant susceptible de mettre en évidence des facteurs de contrôle de la distribution des sols complémentaires. Un verrou important de l'intégration des bases de données à de vastes échelles reste l'harmonisation, en particulier en ce qui concerne les protocoles de mesures. Le réseau global des laboratoires d'analyses de sol (GLOSOLAN, <https://www.fao.org/global-soil-partnership/glosolan/en/>), mis en place dans le cadre du partenariat mondial sur les sols, devrait faciliter cette harmonisation et/ou l'établissement de fonctions de conversions de résultats obtenus en mettant en œuvre des protocoles analytiques différents.

Quelques faits marquants et indicateurs de réussite du GIS Sol

L'objectif du présent article n'est pas de détailler l'ensemble des programmes soutenus par le GIS Sol, ni les résultats obtenus, ce qui est fait dans la suite de ce numéro ainsi que dans un autre numéro spécial consacré au RMQS (Jolivet et Chabrit (eds), édition en cours), mais de souligner quelques faits marquants. Cinquante mille utilisateurs par an sont aujourd'hui identifiés. En 2022, de très nombreuses actions ont été comptabilisées sur les géoserveurs (968 000 sur agroenvgeo, 2 500 000 sur BDAT, 8973 fichiers téléchargés). Le rapport sur l'état des sols de France (RESF; GIS Sol, 2011) et ses synthèses françaises et anglaises ont été extrêmement téléchargées et citées. Au plan des politiques publiques, le GIS Sol a permis de contribuer à la révision du classement des zones défavorisées, d'intégrer la composante sol dans la comptabilité annuelle des émissions de gaz à effet de serre réalisée par le CITEPA, de contribuer à une meilleure définition du « fond pédo-géochimique » pour de nombreux contaminants, de contribuer aux efforts de cartographie mondiale menés dans le cadre du partenariat global sur les sols de la FAO et des Nations Unies. Au plan de la couverture géographique et thématique, les données sur les sols, initialement majoritairement agricoles, se sont ouvertes très largement aux sols forestiers, aux sols « semi-naturels » ainsi qu'aux sols urbains et périurbains et aux sites contaminés. Cette ouverture était particulièrement nécessaire, dans la mesure où la gestion de l'espace et des sols nécessite une approche intégrée qui n'a pas, par définition, de véritables frontières, qui sont par essence mobiles. Au plan scientifique, la production d'articles nationaux et internationaux a dépassé les espérances initiales, parfois dans des revues de très haut niveau (*Nature Communications, Science Advances, Global Change Biology...*). La France est aujourd'hui citée internationalement, tant au plan de son organisation pour constituer un système d'information décisionnel sur les sols, que de celui des avancées méthodologiques et scientifiques rendues possibles grâce au

GIS Sol, et de celui du Conservatoire Européen d'Echantillons de Sols (CEES; Ratié *et al.*, 2010) qui a pris une dimension internationale en accueillant les échantillons du programme européen ICOS. Les données produites par le GIS Sol sont utilisées par une très large communauté qui va des décideurs publics aux gestionnaires de l'espace, à la recherche, par des approches de modélisation et de prévision de l'évolution des sols, pour leur protection et l'évaluation des services écosystémiques associés (Eglin *et al.*, 2021).

A contrario, il reste que beaucoup de données ne sont pas encore entièrement en « données-ouvertes » (*i.e.* librement accessibles et téléchargeables par tous gratuitement). Cela tient en partie au statut juridique des données (le sol est le plus souvent propriété privée en France), ainsi qu'au multi partenariat et donc à la multi propriété (au moins intellectuelle) des bases de données. Certaines données, comme des prédictions de propriétés par cartographie numérique - excluant les coordonnées aux points de mesure - commencent à être librement distribuées. De même, en ce qui concerne la BDAT et le RMQS, des statistiques agrégées sont entièrement libres d'accès. Dans le cas de projets précis, des conventionnements peuvent être établis pour avoir accès aux coordonnées et données des points de mesure, mais elles ne doivent en aucun cas être diffusées librement ni revendues. Pour plus de détail, nous renvoyons à ce sujet à Sigal-Guille *et al.* (sous-presse). Un article spécifique devrait être également soumis dans ce numéro spécial.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Attendu au départ sur la production de données sur les sols, ce qu'il fait toujours, le GIS Sol est désormais également attendu sur la capitalisation des données, qu'elles soient issues de territoires, de régions, d'opérations publiques ou privées. Il est également fortement sollicité pour une diffusion des données de la manière la plus opérationnelle et interopérable possible pour différents acteurs. Les besoins peuvent concerner des données brutes décrivant les sols, leur répartition spatiale, leurs propriétés ou ensembles de propriétés, qui contribuent aux fonctions et services écosystémiques des sols. L'évolution des membres du GIS Sol a progressivement conduit à développer une stratégie d'acquisition et de diffusion des données sur les sols, en lien avec d'autres enjeux environnementaux, comme l'eau (BRGM, OFB) ou la biodiversité (OFB, MNHN). Les sols sont au carrefour de nombreux enjeux environnementaux, de développement durable et de gestion à toutes les échelles, comme celle de la planification de l'aménagement du territoire, de la réhabilitation des sites contaminés, de l'exposition humaine aux contaminants et de santé publique, d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, de mise en place d'énergies renouvelables, d'empreinte de nos modes de gestion

des sols et d'alimentation sur d'autres territoires, etc. L'enjeu de santé humaine émerge désormais fortement.

L'objectif est de faciliter l'accès aux données, de faciliter leur appropriation afin que tous les acteurs, à quelque niveau géographique ou politique qu'ils se situent, puissent utiliser des informations harmonisées, fiables et interopérables, de façon à optimiser la gestion de cette ressource non renouvelable et essentielle aux services écosystémiques attendus par la société. Un des enjeux pour la gestion locale est de développer des méthodologies pour des cartographies plus précises, à haute résolution spatiale, de les traduire en cartes de multifonctionnalité des sols (y compris de fonctions écologiques et de services écosystémiques associés). Cet objectif est particulièrement important pour accompagner la politique Zéro artificialisation nette (ZAN; issue de la loi Climat et Résilience du 22/08/2021) et la prise en compte de l'artificialisation des sols lors de l'élaboration des SCOT, des PLUi ou des PLU. Il l'est également à toutes les échelles où des décisions locales sont prises (massifs forestiers, parcs naturels, bassins-versants, exploitations agricoles...). Au-delà de la gestion locale, le GIS Sol assure, et doit continuer d'assurer le lien avec les politiques européennes et mondiales (Commission Européenne, FAO, Conventions Internationales). Le GIS Sol pourra ainsi poursuivre son rôle de contributeur à une politique de gestion sobre et résiliente des sols aux échelles locales, continentales et mondiales. Il est aujourd'hui majeur et bien rôdé. Les dynamiques actuelles européenne et mondiale sur les sols devraient encore renforcer sa légitimité et son ouverture.

REMERCIEMENTS

Nous dédions cet article à Marcel Jamagne et à Dominique King qui furent deux visionnaires de l'évolution de la cartographie des sols en France et en Europe.

Nous remercions très vivement l'ensemble des personnels, permanents et non permanents, de l'unité InfoSol et des organismes qui collaborent aux nombreux programmes du GIS Sol. Nous remercions également très vivement tous les membres du secrétariat permanent et du Haut comité de groupement du GIS Sol qui ont travaillé à sa création et à son évolution au cours de ces 20 années. Nous avons établi une liste la plus exhaustive possible de ces personnes à partir des archives conservées précieusement à INRAE. Nous prions par avance des personnes qui auraient été oubliées de bien vouloir nous en excuser. Par ailleurs, nous avons maintenu dans cette liste certains auteurs de cet article. Que ceci ne soit pas considéré comme de l'auto-satisfaction, mais comme simple un souci d'exhaustivité!

Ministère en charge de l'agriculture: Sébastien Bouvatier, Jean-Luc Flot, Catherine Gibaud, Jean-Philippe Grelot, Frédéric Laffont, Guy Landmann, Patricia Laville, Sandrine Leménager, Fanny Heraud, Valérie Maquère, Gérard Levast,

Didier Rat, Daniel Rocchi, Pierre Schwartz, Marie-Françoise Slak, Jean-Claude Souty, Rik Vandererven, Philippe Vissac,
Ministère en charge de l'environnement: Véronique Antoni, Patricia Corrèze-Lénéé, Alain Creusot, André-Bernard Delmas, Christian Feuillet, Patrick Flammarion Irénée Jossard, Claire de Kermadec, Marina Le Louarer, Benoît Lesaffre, Anne Lieutaud, Valéry Morard, Béatrice Michalland, Jean-Louis Perrin, Michel Robert, Jean-Claude Vial, Eric Vindimian.

Au départ en tant qu'IFEN: Philippe Boiret, François Moreau, Jean-Pierre Renaud, Jacques Thorette, Bruno Trégouët

ADEME: Antonio Bispo, Daniel Clément, Thomas Eglin, Isabelle Feix, Jacques Labeyrie, Jérôme Mousset, Antoine Pierart

BRGM: Jean-François Brunet, Philippe Freyssinet, Dominique Guyonnet

IGN: Loïc Commagnac, Nathalie Eltchaninoff, Jean-Marc Fremont, Edith Merillon (**Au départ en tant qu'IFN**: Claude Vidal, Jean-Pierre Renaud, Jean-Christophe Hervé.)

INRAE (INRA avant 2020): Dominique Arrouays, Marion Bardy, Antonio Bispo, Jean Boiffin, Thierry Caquet, Chantal Gascuel, Françoise Juille, Florence Héliès, Nicolas de Menthère, Marie Rabut, Pierre Renault, Pierre Stengel, Thérèse Volay, Jean-François Soussana

IRD: Alain Beaudou, Thierry Becquer, Jean Boulègue, Michel Brossard

OFB: Nolwenn Bougon, François Hissel, René Lalement, Antoine Levêque

RMT Sols et Territoires (Invitée permanente): Joelle Sauter

Notons par ailleurs, qu'au sein de l'INRA (puis INRAE), au-delà de la création même du GIS Sol, les **départements successifs EA, EFPA et AgroEcoSystems**, ont été particulièrement moteurs dans leur soutien (arbitrages de postes, financements d'équipements, de Post-Docs, de programmes d'assurance qualité, de projets innovants/paris scientifiques, et de mise à disposition de personnes pour animer des conseils scientifiques...), ainsi que dans l'incitation des autres unités de recherche à utiliser les données et échantillons issus des programmes du GIS Sol. Qu'ils soient ici également remerciés pour leur aide et leur soutien.

Enfin nous remercions vivement un relecteur (ou une relectrice) anonyme, et Guy Richard pour leurs commentaires critiques très constructifs d'une première version de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Adhikari K., Hartemink A.E. (2016). Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, 101–111.
- Arrouays D., King C., Vion I., Le Bissonnais Y. (1996) Detection of soil crusting risks related to low soil organic carbon contents by using discriminant analysis on thematic mapper data. *Geocarto International*, 11 (4):11-16.
- Arrouays D., Vogel H., Eckelmann W., Armstrong-Brown S., Loveland P., Coulter B. (1998). Soil monitoring networks in Europe. 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France, August 1998.
- Arrouays D., Martin S., Leprêtre A., Bourennane H. (2000). Short range spatial variability of metals in an agricultural plot. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 31 (3-4): 387-400.
- Arrouays D., Thorette J., Daroussin J., King D. (2001). Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 8 (1):7-18.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N.P.A., Grolleau E. (2002). Une initiative nouvelle en France: la mise en place d'un Réseau multi-institutionnel de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). *C. R. Acad. Agr. Fr.* 88(5) : 93-105.
- 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.
- Arrouays D., Lagacherie P., Hartemink A.E. (2017). Digital soil mapping across the globe. *Geoderma Regional*, 9, 1-4.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>
- Arrouays D., Mulder V.L., Richer-de-Forges A.C. (2021). 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., Dawson L. (2022). Soil Priorities around the World - An introduction. *Geoderma Regional*, 30, e00555, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00555>.
- Baize D., Saby N.P.A., Deslais W., Bispo A., Feix I. (2006). Analyses totales et pseudo-totales d'éléments en traces dans les sols – Principaux résultats et enseignements d'une collecte nationale. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 181-200.
- Baize D., Duigou N., Mathieu A. (2011). Éléments en traces dans les sols. Valeurs de référence locales en île-de-France. *Environnement et Technique*, n°306, pp. 54-56.
- Barthod C. (1994). Le système de surveillance de l'état sanitaire de la forêt en France. *Revue Forestière Française*, XLVI, 5, 564-571.
- Bernoux M., Chenu C., Blanchart E., Eglin T., Bispo A., Bardy M., King D. (2011). Le programme GESSOL 2: impact des pratiques sur les matières organiques les fonctions des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 18 (3), 137-145.
- Bispo A., Guellier C., Martin E., Sapjanskas J., Souvelet H., Chenu C. (eds). (2016). Les sols. Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable. Collection Savoir-faire. Editions Quae, France. 304 p.
- Bispo A., Arrouays D., Saby N.P.A., Boulonne L., Fantappiè M. (2021). Proposal of methodological development for the LUCAS programme in accordance with national monitoring programmes. EJP SOIL - Deliverable 6.3. https://ejpsol.eu/fileadmin/projects/ejpsol/WP6/EJP_SOIL_Deliverable_6.3_Dec_2021_final.pdf
- Bispo A., Fantappiè M., van Egmond F., Smreczak B., Bakacsi Z., Hessel R., Wetterlind J., Siebec G., Jones A. (2022). A review of existing soil monitoring systems to pave the way for the EU Soil Observatory. *World Congress of Soil Science*, 1-5 août 2022, Glasgow, Royaume Uni.

- Bonneau M., Belkacem S., Nys C., Ranger J., Gelhaye D., Lefèvre Y., Humbert D. (2000). Evolution d'un sol forestier acide des Vosges sur une période de 10 ans - Observatoire de la Qualité des Sols du DONON. *Étude et Gestion des Sols*, 7 (2), 99-117.
- Bornand M. (1997). Connaissance et suivi de la qualité des sols en France. Etat des lieux. Enjeux. Besoins en données. Propositions pour une gestion raisonnée de la ressource en sol. Rapport MAPA-MAE-INRA, INRA Montpellier. 176 p.
- Bornand M., Arrouays D., Jamagne M., Baize D. (1989). Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle du 1/250.000. *Science du Sol*, 27(1), 17-20.
- 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.
- 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.
- CEE (1987). Règlement (CEE) n° 1696/87 de la Commission du 10 juin 1987 portant certaines modalités d'application du règlement (CEE) n° 3528/86 du Conseil relatif à la protection des forêts dans la Communauté contre la pollution atmosphérique (inventaires, réseau, bilans). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A31987R1696&qid=1603811041011>
- 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.
- 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>
- Citeau L., Bispo A., Bardy M., King D. (eds) (2008). Gestion durable des sols. Collection: Savoir-faire. Editions Quae, France. 336 p.
- CPCS. 1967. Classification des sols. CPCS 1967 (Commission de Pédologie et de Cartographie des sols). Editions Association Française pour l'Etude des Sols (AFES), France. 96 p. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/11/CPCS_1967.pdf.
- Duigou N., Baize D. (2010). Nouvelle collecte nationale d'analyses d'éléments en traces dans les sols (horizons de surface) - (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn). Rapport final. Contrat ADEME 0875C0036. 284 pages.
- Duigou N., Baize D., Bispo A. (2011). Utilisation de la base de données BDETM pour obtenir des valeurs de références locales en Éléments Traces Métalliques – Cas de la région Centre. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 91-108.
- 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
- Eymard A. (2022). Comparaison d'informations pédologiques de sources différentes. Cohérence, complémentarités, intérêt de leur utilisation conjointe pour la cartographie. Une étude pilote sur les sols forestiers du département du Loiret. Mémoire de fin d'Études, Bordeaux Sciences Agro, 40 p + annexes.
- Favrot J.C., Arrouays D., Bornand M., Girard M.C., Hardy R. (1994). Cartographie et gestion des ressources en sol de France: Le programme Inventaire, Gestion et Conservation des sols. Cahiers d'études et de recherches francophones, *Agricultures*, 3(4), 237-246.
- Favrot J.C., Lagacherie P. (1989). La valorisation de l'information pédologique: l'exemple des secteurs de référence drainage. *Science du Sol*, 27(1), 109-112.
- Gaultier J.P., Legros J.P., Bornand M., King D., Favrot J.C., Hardy R. (1993). L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées: le projet DONESOL. *Revue de Géomatique*, 3, 235-253.
- GIS Sol. (2011). L'état des sols de France. Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, France. 187 p. (+ synthèses de 24 p. en français et en anglais). Téléchargeables sur: <https://www.gissol.fr> (dernier accès 8 avril 2022).
- Hervé J.J., Urbano G. (1983). L'opération drainage - secteur de référence ONIC-Ministère de l'Agriculture. Actes du colloque CECENA.
- Jamagne M. (1967). Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Annales Agronomiques* 18, 142 numéro hors-série.
- Jamagne M., Bornand M., Hardy, R. (1989). La cartographie des sols en France à moyenne échelle. Programmes en cours et évolution des démarches. *Science du sol*, 27, 301-318.
- 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.
- Jolivet C., Boulonne L., Ratié C. (2006) Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, édition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p.
- Jolivet C., Almeida-Falcon J.-L., Berché P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehmann S., Maître B., Ratié C., Schellenberger E., Soler-Dominguez N. (2018). Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2: deuxième campagne métropolitaine, 2016 – 2027, Version 3, 136 p., INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France, ISBN: 2-7380-1416-X.
- Jolivet C., Chabrit D. (Eds). (En cours d'édition). Les 20 ans du RMQS. *Étude et Gestion des sols*. Numéro spécial « 20 ans du GIS Sol ».
- Journal officiel de la République française. (1961). Loi n° 61-1489 du 26 décembre 1961 relative à l'accueil et à la réinstallation des Français d'outre-mer. *Journal officiel de la République française. Lois et décrets* 11996-11997 n° 0304. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000508788> (dernier accès : 06/04/2022).
- 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.
- King D., Jamagne M., Arrouays D., Bornand M., Favrot J.C., Hardy R., Le Bas C., Stengel P. (1999). Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. Etat d'avancement et exemples d'utilisation. *Étude et Gestion des Sols*, 6(4), 215-228.
- Lacarcé 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.
- Laroche B., Richer-de-Forges A.C., Saby N.P.A., Martelet G., Tourlière B., DeParis J., Messner F., Wetterlind J., Moulin J., Froger D., Arrouays D. (2013). Potentiel de la spectrométrie gamma aéroportée pour la cartographie des sols et du régolithe: une mini-revue et des premiers exemples en régions Centre et Limousin. *Étude et Gestion des Sols*, 20(1), 15-28.
- Laroche B., Richer-de-Forges A.C., Leménager S., Arrouays D., Schnebelen N., Eimberck M., Toutain B., Lehmann S., Tientcheu E., Héliès F., Chenu J.-P., Parot S., Desbourdes S., Girot G., Voltz M., Bardy M. (2014). Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols. Volet Référentiel Régional Pédologique. *Étude et Gestion des Sols*, 21, 125-140.
- Legros J.-P. (1996). Cartographies des sols: de l'analyse spatiale à La gestion des territoires, 1^{re} édition, Collection Gérer l'environnement. Presses Polytechniques et Univ. Romandes, Lausanne, Suisse.
- Legros J.P., Martin S., Baize D., Rivière J.M., Leprêtre A. (2002). Les épandages d'effluents d'élevage en Bretagne - Accumulation de cuivre et de zinc dans une parcelle de l'Observatoire de la qualité des sols (O.Q.S.). pp. 169-182. In: « Les Éléments traces métalliques dans les sols – Approches fonctionnelles et spatiales » D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris. 570 p.
- Loiseau T., Richer-de-Forges A.C., Martelet G., Bialkowi A., Nehlig P., Arrouays D. (2020). Could airborne gamma spectrometric data replace lithological maps as co-variables for digital soil mapping of topsoil particle-size distribution? A case study in Western France. *Geoderma Regional*. 22, e00295.

- Maréchal A., Jones A., Panagos P., Beltrandi 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 S., Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Ciesielski H., Gaultier J.-P., Lavelle P., Legros J.-P., Leprêtre A., Sterckeman T. (1999). Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observatoire de la Qualité des Sols. *Étude et Gestion des Sols*, 6 (3), p. 215-230.
- Martelet G., Drufin S., Tourlière B., Saby N.P.A., Perrin J., DeParis J., Prognon J.F., Jolivet C., Ratié C., Arrouays D. 2013. Regional regolith parameters prediction using the proxy of airborne gamma ray spectrometry. *Vadose Zone Journal*, 12(4). 1-14. doi:10.2136/vzj2013.01.0003
- McBratney A., 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. *Étude et Gestion des Sols*, 28 (1), 57-70.
- Ministère de l'Agriculture (non daté). La Carte des Terres Agricoles. Une gajeure ou une réalité ? Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Aménagement, Paris France. 8 pp. <http://www.lecf.fr/new/articles/97-article-704.pdf>. (dernier accès le 7 avril 2022).
- 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.
- 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.
- 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.
- Poggio L., de Sousa L.M., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Riberio E., Rossiter D. (2021). SoilGrids 2.0: producing quality-assessed soil information for the globe. *SOIL*, 7 (1), 217-240. DOI10.5194/soil-7-217-2021.
- Ponette Q., Ulrich E., Brêthes A., Bonneau M., Lanier M. (1997). RENECOFOR. Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau, campagne de mesures 1993/1995. Office National des Forêts, Département des recherches techniques. Fontainebleau (France), 427 p.
- 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., Baffet M., Berger C., Coste S., Courbe C., Jalabert S., Lacassin J.-C., Maillant S., Michel F., Moulin J., Party J.-P., Renouard C., Sauter J., Scheurer O., Verbèqque B., Desbourdes S., Héliès F., Lehmann S., Saby N.P.A., Tientcheu E., Jamagne M., Laroche B., Bardy M., Voltz M. (2014). La cartographie des sols à moyennes échelles en France métropolitaine. *Étude et Gestion des sols*, 21(1). 25-36.
- 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.
- 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., Lemercier B., Arrouays D., Leménager S., Louis B.P., Millet F., Paroissien J.-B., Schellenberger E., Squivident H., Swiderski C., Toutain B., Walter C., Bardy M. (2014). Le programme Base de Données d'Analyses de Terre. Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Étude et Gestion des Sols*, 21, 141-150.
- Saby N.P.A., Swiderski C., Lemercier B., Walter C., Benjamin P., Louis B.P., Eveillard P., Arrouays D. (2017). Is pH increasing in the non-calcareous topsoils of France under agricultural management? A statistical framework to overcome the limitations of a soil test database *Soil Use Manag.*, 33, 460-470.
- Schvartz C., Walter C., Claudot B., Bouédo T., Arousseau P. (1997). Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994: I. Constitution d'une banque de données cantonales. *Étude et Gestion des Sols*, 4 (3), 191-204.
- SDES. (2021). Compte satellite de l'environnement, 2021. Service des données et études statistiques (SDES). Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires.
- Sigal-Guille C., Demenois J., Chevallier T., Bénédet F., Le Bas C., Bispo A., Corbière P. (sous-pressé). Protection et diffusion des données sur les sols: des règles à comprendre pour mieux les intégrer aux recherches. *Étude et Gestion des Sols*, sous presse.
- Thorette J., Arrouays D. (1999). Proposition pour la mise en place d'un dispositif national d'inventaire et d'observation des sols (DINIOS). Rapport IFEN/INRA. 50 p.
- Ulrich E. (1995). Le réseau RENECOFOR: objectifs et réalisation. *Revue forestière française*, XLVII, 2, 107-124.
- Villanneau E., Perry-Giraud C., Saby N., Jolivet C., Marot F., Maton D., Floch-Barneaud A., Antoni V., Arrouays D. (2008). Détection de valeurs anormales dans les teneurs en ETM des sols, basée sur le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols. *Étude et Gestion des Sols*, 15(3), 183-200.
- Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemercier B., Richer-de-Forges A.C., Sauter J., Schnebel N. (2020). Possible futures of soil mapping in France. *Geoderma Regional*, 23, e00334.
- Voynet D., Hervieu B. (2000). La convention-cadre MATE-INRA. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 39, 87-90.
- Walter C., Schvartz C., Claudot B., Bouédo T., Arousseau P. (1997). Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994: II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés *Étude et Gestion des Sols*, 4 (3), 205-219.
- Wopereis M.C., Gascuel-Oudoux C., Bourrié G., Soignet G. (1988). Spatial variability of heavy metals in soil on a one hectare scale. *Soil Science*, 146(2), 113-118.

