

Les programmes du GIS Sol :

20 ans d'ajustement en réponse aux enjeux

A. Bispo^(1*), B. Laroche⁽¹⁾, N.P.A. Saby⁽¹⁾, C. Jolivet⁽¹⁾, C. Ratié⁽¹⁾, C. Le Bas⁽¹⁾,
A.C. Richer-de-Forges⁽¹⁾, F. Helies⁽¹⁾, J.-F. Brunet⁽²⁾, A. Eymard⁽¹⁾, L. Commagnac⁽³⁾,
C. Gascuel-Oudou⁽⁴⁾ et D. Arrouays⁽¹⁾

1) INRAE, Info&Sols, F-45075, Orléans, France

2) BRGM, Orléans, France

3) IGN, 33160 Saint-Médard-en-Jalles, France

4) INRAE, Institut Agro, UMR SAS, Rennes, France

* Auteur correspondant : antonio.bispo@inrae.fr

RÉSUMÉ

En 2001, la convention de création du Groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS Sol) précisait les enjeux liés à la connaissance des sols, dressait le bilan de la situation nationale et proposait des objectifs et un plan de travail. Le GIS Sol s'est alors organisé pour répondre à un besoin grandissant d'informations sur les sols, visant à garantir leur conservation et leur gestion rationnelle et durable, permettant de détecter les répercussions des activités humaines sur le sol en questionnant leur évolution de moyen et long terme. Les missions dévolues au GIS Sol ont été et restent de : stimuler et développer des réseaux de mesure de propriétés des sols, notamment de leur qualité ; prendre en charge, sur le long terme, la gestion des programmes d'acquisition et de gestion des données ; surveiller et alerter sur l'état des sols ; diffuser l'information sur les sols ; former et sensibiliser à l'usage des données sur les sols ; collecter et/ou gérer des informations concernant les sols ; conserver des échantillons de sol.

Les membres du GIS Sol se sont appuyés sur un réseau de partenaires en région et sur l'unité INRAE Info&Sols (anciennement INRA InfoSol), pour piloter des programmes historiques de long terme tels que IGCS (Inventaire, Gestion et conservation des sols), RMQS (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols), BDAT (Base de données des Analyses de Terre) et BDETM (Base de Données Eléments Traces Métalliques). Plus récemment d'autres programmes sur les

Comment citer cet article :

Bispo A., Laroche B., Saby N.P.A., Jolivet C., Ratié C., Le Bas C., Richer-de-Forges A.C., Helies F., Brunet J.-F., Eymard A., Commagnac L., Gascuel-Oudou C. et Arrouays D., 2025 - Les programmes du GIS Sol : 20 ans d'ajustement en réponse aux enjeux - *Étude et Gestion des Sols*, 32, 09-39

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-32/>

Comment consulter/télécharger

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

sols urbains et forestiers ont rejoint le GIS Sol, respectivement en lien avec l'adhésion du BRGM et de l'IGN. Ces programmes initiés et/ou renforcés à cette époque ont connu, en 20 ans, des développements sous l'égide du GIS Sol. Le site web du GIS Sol (www.gissol.fr) est aujourd'hui le portail d'entrée sur les programmes et les données sur les sols de France, mettant à disposition des échantillons (à travers le Conservatoire Européen des Echantillons de Sol) et des informations sous des formes diverses (jeux de données, tableaux statistiques et cartographies...).

En plus de 20 ans, le GIS Sol a ainsi piloté l'acquisition, la capitalisation, l'exploitation et la diffusion des informations sur les sols. Ce dispositif, basé sur une collaboration d'institutions publiques, fait assez rare en Europe, est souvent cité en exemple. Au-delà du bilan, cet article présente les orientations et les moyens nécessaires (ex : nouvelles échelles à couvrir, données à acquérir) pour intégrer pleinement les sols dans les nombreux défis que sont l'alimentation et la santé des populations, l'atténuation et l'adaptation des territoires au changement climatique, le développement de la bioéconomie, la gestion des ressources en eau ou encore la préservation de la biodiversité et l'aménagement.

Mots-clés

Sol, surveillance, inventaire, France, cartographie, base de données, GIS Sol.

SUMMARY

THE VARIOUS GIS SOL PROGRAMMES: What have we done for 20 years?

In 2001, the consortium agreement setting up the GIS Sol (Groupement d'Intérêt Scientifique Sol) identified the main challenges associated with soil knowledge, took stock of the national situation and proposed objectives for the future accompanied by a work plan. The GIS Sol was then organised to meet a growing need for information on soils, aimed at guaranteeing their conservation and their rational and sustainable management, making it possible to detect the repercussions of human activities on the soil by questioning their medium- and long-term evolution. GIS Sol's missions have been, and remain, to: stimulate and develop networks for measuring soil properties, particularly soil quality; take charge of long-term management of data acquisition and management programmes; monitor and alert on soil conditions; disseminate soil information; train and raise awareness on the use of soil data; collect and/or manage soil information; conserve soil samples.

The members of the GIS Sol have relied on a network of regional partners and the INRAE Info&Sols unit (formerly INRA InfoSol) to steer long-term historical programmes such as IGCS (Inventory, Management and Conservation of Soils), RMQS (Soil Quality Measurement Network), BDAT (Soil Test Database) and BDETM (Trace Element Database). More recently, other programmes on urban and forest soils have been added respectively in conjunction with BRGM and IGN. All these programmes, which were initiated and/or strengthened at that time, have expanded over the last 20 years under the aegis of GIS Sol. The GIS Sol website (www.gissol.fr) is now the gateway to French soil programmes and data, providing samples (through the Conservatoire Européen des Echantillons de Sol) and information in a variety of forms (data sets, statistical tables and maps, etc.).

Over more than 20 years, the GIS Sol has managed the acquisition, capitalisation, use and dissemination of soil information. This system, based on collaboration between public institutions, is quite rare in Europe and is often cited as an example. As well as taking stock of the situation, this article sets out the guidelines and resources needed (e.g. new scales to be covered, data to be acquired) to fully integrate soil into the many challenges facing the food and health of populations, the mitigation and adaptation of territories to climate change, the development of the bioeconomy, the management of water resources and the preservation of biodiversity and land use planning.

Key-words

Suelo, vigilancia, inventario, Francia, cartografía, base de datos, GIS Sol.

RESUMEN

LOS PROGRAMAS DEL GIS SOL: 20 años de ajuste en respuesta a los desafíos

En 2001, el convenio de creación del Consorcio de interés científico Suelo (GIS Sol) precisaba los desafíos vinculados al conocimiento de los suelos, hacía el balance de la situación nacional y proponía objetivos y un plan de trabajo. El GIS Sol se organizó entonces para responder a una necesidad creciente de información sobre los suelos, con el fin de garantizar su conservación y su gestión racional y sostenible, que permite detectar los efectos de las actividades humanas sobre el suelo cuestionando sus evoluciones a medio y largo plazo. Las misiones encomendadas al GIS Sol fueron y siguen siendo: estimular y desarrollar redes de medición de propiedades de los suelos, en particular de su calidad; hacerse cargo, a largo plazo, de la gestión de los programas de adquisición y gestión de datos; vigilar y alertar sobre el estado de los suelos; difundir información sobre los suelos; formar y sensibilizar sobre el uso de los datos sobre los suelos; recoger y/o gestionar informaciones sobre los suelos; conservar muestras de suelo.

Los miembros del GIS Sol se apoyaron en una red de asociados en las regiones y en la unidad INRAE Info&Sols (anteriormente INRA InfoSol), para pilotar programas históricos a largo plazo como IGCS (Inventario, Gestión y Conservación de los Suelos), RMQS (Red de Mediciones de la Calidad de los Suelos), BDAT (Base de Datos de los Análisis de Tierra) y BDETM (Base de Datos Elementos Trazas Metálicos). Más recientemente, otros programas sobre suelos urbanos y forestales se unieron al GIS Sol, en relación con la adhesión del BRGM y el IGN, respectivamente. Estos programas iniciados y/o reforzados en aquella época han conocido, en 20 años, desarrollos bajo la égida del GIS Sol. El sitio web del GIS Sol (www.gissol.fr) es hoy el portal de entrada sobre los programas y los datos sobre los suelos de Francia, poniendo a disposición muestras (a través del Conservatorio Europeo de Muestras de Suelo) e informaciones en diversas formas (conjuntos de datos, cuadros estadísticos y cartografías...). Durante más de 20 años, el GIS Sol dirigió la adquisición, la capitalización, la explotación y la difusión de información sobre los suelos. Este dispositivo, basado en una colaboración de instituciones públicas, es bastante raro en Europa y se cita a menudo como ejemplo. Más allá del balance, este artículo presenta las orientaciones y los medios necesarios (ex: nuevas escalas a cubrir, datos a adquirir) para integrar plenamente los suelos en los numerosos desafíos que son la alimentación y la salud de las poblaciones, la mitigación y la adaptación de los territorios al cambio climático, el desarrollo de la bioeconomía, la gestión de los recursos hídricos o la conservación de la biodiversidad y la ordenación.

Palabras clave

Suelo, vigilancia, inventario, Francia, cartografía, base de datos, GIS Sol.

1. INTRODUCTION

En 2001, la convention de creación del Groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS Sol), reuniendo los Ministerios en charge de l'agriculture et de l'environnement, l'ADEME, l'IFEN et l'INRA, precisait les enjeux liés à la connaissance des sols, dressait le bilan de la situation nationale et proposait des objectifs et un plan de travail pour le GIS Sol. En 20 ans, les grands enjeux liés au sol (*Tableau 1*) ont peu évolué. Les principales dégradations des sols étaient déjà listées, y compris la perte de biodiversité des sols. Si à la lumière des connaissances actuelles, certaines conséquences pourraient être plus détaillées (ex : les dégradations biologiques entraînent une perte d'une partie du pouvoir épurateur ou encore de la productivité agricole), il n'empêche que les principaux impacts étaient mentionnés. L'accent était plus mis sur les dégradations que sur les diverses fonctions et services écosystémiques rendus par les sols. Si leur rôle relatif à la sécurité alimentaire était déjà bien explicité, la multifonctionnalité des sols et notamment l'approvisionnement en eau, la santé ou encore l'atténuation du changement climatique sont des préoccupations plus récentes, mises notamment en exergue en France par le programme GESSOL (Citeau *et al.*, 2008 ; Bispo *et al.*, 2016) et les communications des instances européennes sur les sols (European Commission, 2006, 2023). Des articles ont été récemment publiés sur les apports du GIS Sol à ces différents enjeux (Imbert *et al.*, 2024 ; Martin *et al.*, 2024 ; Brossard *et al.*, 2023 ; Froger *et al.*, 2023b ; Brunet *et al.*, 2023). Depuis l'année internationale des sols en

2015, la notion de services rendus par les sols à l'humanité et leurs rôles dans le développement durable de nos sociétés est devenue prépondérante, même si les dégradations listées dans le *tableau 1* restent une préoccupation tant des politiques publiques que de la recherche (Qu, 2022).

La convention de création du GIS Sol faisait état d'un besoin grandissant d'informations sur les sols pour leur conservation et leur gestion durable, notamment dans le contexte international des négociations politiques et des compétitions économiques (stockage de carbone, durabilité des agroécosystèmes, désertification, qualité et traçabilité des produits issus de l'agriculture, quotas de production...). Il s'agissait également de détecter les impacts des activités humaines sur les sols, en questionnant leurs évolutions de court terme, tel l'effet d'événements (coulées boueuses, sécheresse...), ou de moyen ou long terme (statut organique, pollutions diffuses atmosphériques...). Face à ces questions, des outils de suivi et des modèles de fonctionnement des sols sont devenus nécessaires. Le constat posé était celui d'une insuffisance des programmes nationaux pour répondre à ces enjeux de connaissance et de gestion.

Le Groupement d'intérêt scientifique Sol a alors eu pour objectif de fédérer les efforts d'observation des sols, pour répondre à la demande d'informations dans les domaines de l'environnement et de l'agriculture. Une attention particulière a été portée au développement de réseaux de collecte des données sur les sols et à la diffusion des informations associées. Les missions essentielles dévolues au GIS Sol ont été de : stimuler et développer des réseaux de mesure de propriétés

Tableau 1. Les principales dégradations des sols (issues de la convention de création du GIS Sol en 2001)**Table 1.** Main soil degradations (based on the consortium agreement creating the GIS Sol in 2001)

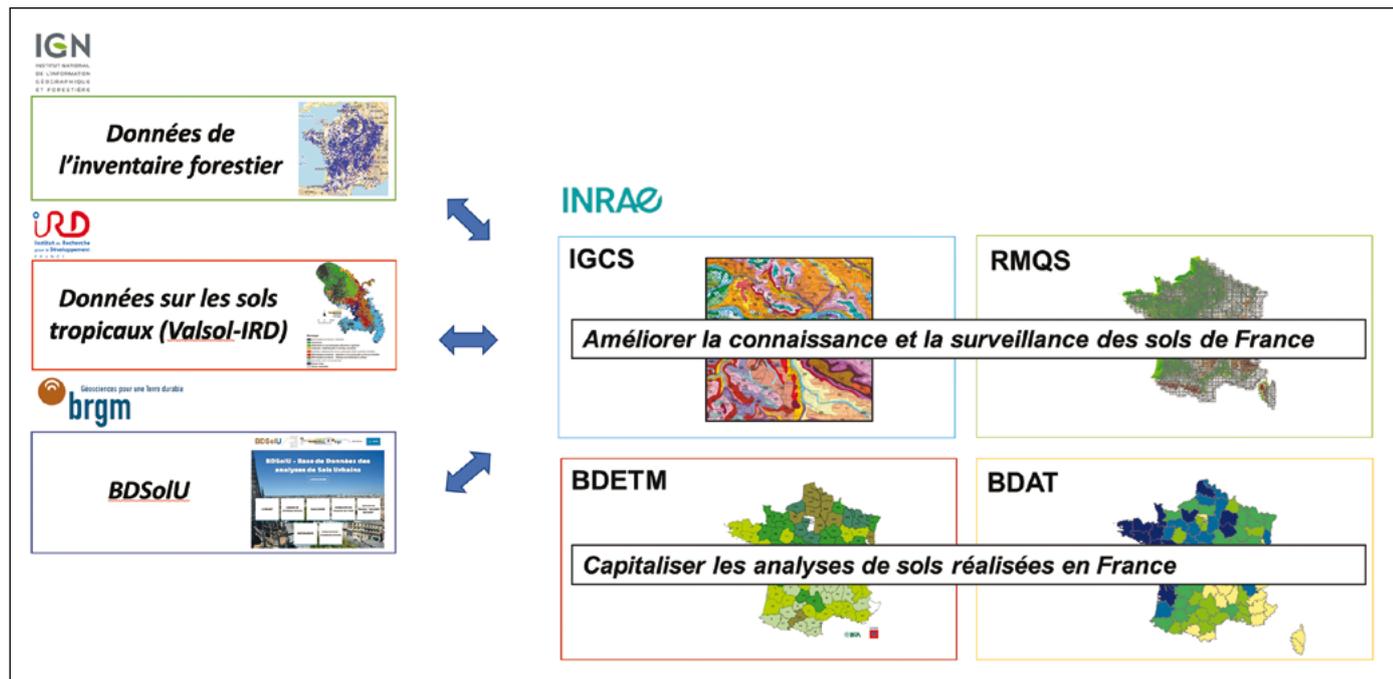
Problèmes		Conséquences
Dégradation physique	<ul style="list-style-type: none"> - artificialisation – imperméabilisation - compaction - érosion 	Pertes en récoltes et terres agricoles, pertes de fonctionnalités épuratrices, baisse de productivité agricole, pollution des cours d'eau...
Dégradation chimique	<ul style="list-style-type: none"> - acidification - d'origine industrielle - d'origine agricole - salinisation 	Modification des fonctionnalités du sol et remobilisation des métaux, pollution des eaux de surface et des aquifères, stérilisation des sols, risques pour la santé humaine, toxicité du sol et de ses produits, pertes en terres agricoles
Dégradation biologique	<ul style="list-style-type: none"> - pesticides - perte de matière organique 	Perte de biodiversité, aggravation des dégradations chimiques et physiques, flux de gaz à effet de serre...

des sols ; prendre en charge, sur le long terme, l'administration des données et des programmes ; surveiller et alerter sur l'état des sols ; diffuser de l'information sur le sol ; former/sensibiliser à l'usage des données sur le sol ; collecter et/ou gérer des informations concernant les pressions sur le sol ; conserver des échantillons de sol. Ces missions ont dû prendre en compte différents défis comme (i) les mutations technologiques à l'œuvre au début des années 2000 (technologies de l'information avec la généralisation de l'informatique et des approches (géo)statistiques, systèmes de gestion de base de données, systèmes d'information géographique, techniques d'acquisition nouvelles comme la télédétection, la géophysique, les modèles numériques de terrain, les systèmes de géolocalisation...), (ii) le statut juridique des données, parfois très hétérogène en fonction des régions et des contextes d'acquisition, compliquant la consolidation nationale des bases de données et leur mise à disposition, et (iii) la continuité du savoir-faire, la plupart des personnels impliqués dans les programmes de cartographie étant en âge de prendre leur retraite à court terme. Le GIS Sol a dû alors proposer et déployer de nouvelles stratégies pour l'acquisition, la gestion et la valorisation des informations sur les sols, pour assurer une politique de long terme de la gestion du patrimoine « Sol » en France. Il s'est agi par exemple de bien couvrir l'ensemble des sols (de France hexagonale et des régions ultrapériphériques) et de leurs usages (sols agricoles, sols industriels, sols urbains ou périurbains, sols des espaces forestiers et naturels...). La prise en compte de ces différents enjeux a été progressive.

Le GIS Sol a alors élaboré un ensemble de programmes complémentaires, tout en assurant un lien étroit entre les programmes d'inventaires cartographiques (distribution dans l'espace des types de sol et de leurs propriétés pérennes) et les programmes de surveillance (suivi des variations de la qualité

des sols, réseaux d'alerte) (Arrouays *et al.*, 2022). Ce lien entre un inventaire statique et une prédiction dynamique est essentiel : l'inventaire est un préalable à la configuration d'un réseau de surveillance, comme un outil d'analyse de la représentativité des sites et d'extrapolation des résultats. Il est également le reflet de la distribution d'attributs relativement pérennes du fonctionnement des sols (succession des horizons, type de sol, présence d'horizons diagnostiques, profondeur, etc.). Réciproquement, les réseaux de surveillance, comme la collecte d'analyses de terre, permettent à la fois un enrichissement des données de l'inventaire et un suivi de paramètres variant beaucoup dans le temps. Il s'est donc agi de préciser les rôles et complémentarités de chaque programme, d'imaginer des programmes multi-échelles capables de s'adapter à la diversité des questions posées. Dès le départ, il a été réaffirmé que l'acquisition des données continuerait d'être assurée avec l'aide de partenaires (bureaux d'études, chambres d'agriculture, CNRS, universités...) et que le GIS Sol aurait un rôle de coordination et d'animation scientifique, d'harmonisation nationale, de validation et de certification des données acquises.

Le GIS Sol, au cours des cinq conventions qui ont vu entrer plusieurs nouveaux membres (Arrouays *et al.*, 2022), dispose désormais de six grands programmes et bases de données associés, renseignant sur la nature et les caractéristiques des sols (Figure 1). Ces programmes sont décrits successivement dans cet article, de leur état au démarrage du GIS Sol, à leurs réussites au cours de plus de vingt ans et aux ambitions pour les années à venir.

Figure 1. Les différents programmes et bases de données du GIS Sol**Figure 1.** The various programmes and databases of GIS Sol

*Les données sur les sols tropicaux, initialement renseignées dans la base de données VALSOL-IRD sont en cours d'intégration dans la base de données DoneSol, en lien avec le programme IGCS (Brossard et al., 2023).

2. LE PROGRAMME INVENTAIRE GESTION ET CONSERVATION DES SOLS (IGCS)

Le démarrage

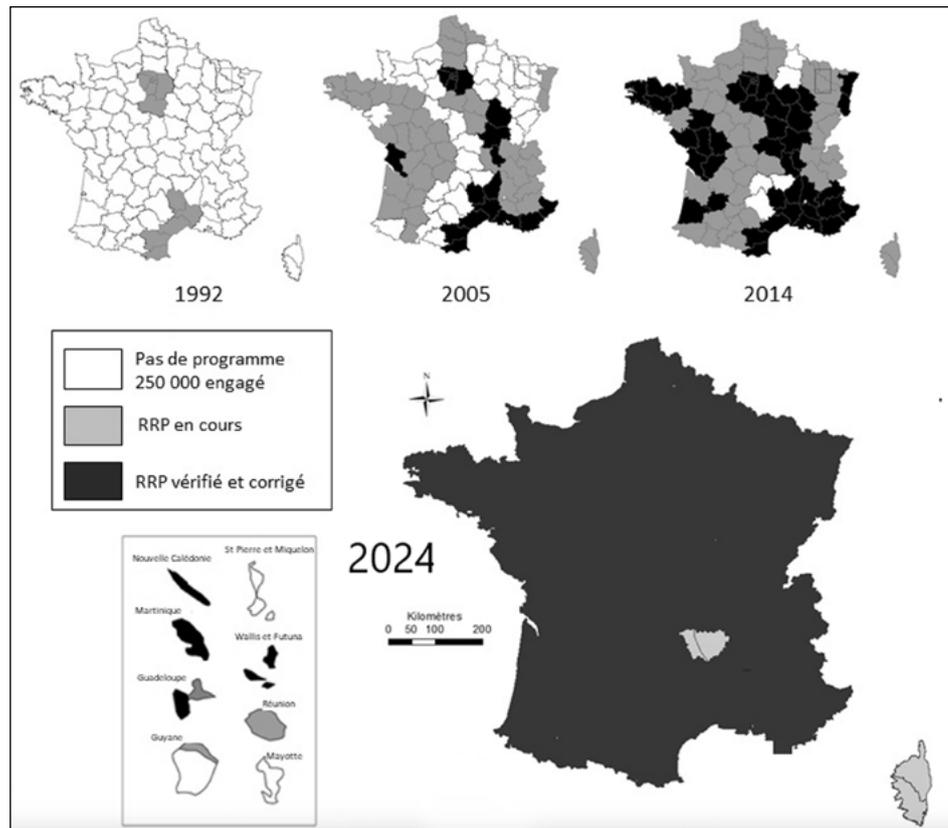
Les inventaires cartographiques initiés dans les années 1960 se sont structurés dans les années 1990 en un programme national unique, le programme IGCS. La principale stratégie a été et reste de capitaliser, sous un format unique DoneSol, les données pédologiques anciennes et d'en acquérir de nouvelles à différentes échelles. Il comporte 3 volets définis selon l'échelle : 1) le Référentiel Régional Pédologique (RRP) qui vise une échelle du 1/250 000 (Laroche et al., 2014) ; la Connaissance Pédologique de la France (CPF), qui porte sur les échelles moyennes (1/100 000 à 1/50 000) et dont l'objectif est d'améliorer la connaissance de la diversité des sols et de leurs répartitions sur la base de leurs facteurs de formation (Richer-de-Forges et al., 2014) ; le Secteur de Référence (SR) qui vise des études pédologiques à grande échelle (de l'ordre de 1/10 000) pour traiter de questions agricoles ou environnementales à l'échelle locale, avec la possibilité de les extrapoler sur une petite région naturelle (Favrot et Lagacherie, 1989).

Assez vite, la priorité a été de viser une couverture nationale des sols compatible avec une restitution à l'échelle du 1/250 000. La création du GIS Sol a permis d'accélérer l'acquisition des Référentiels Régionaux Pédologiques avec, par exemple, leur lancement en Bretagne, ex-Limousin, ex-Alsace, Centre. Ils ont ensuite été initiés dans l'ensemble des régions au fur et à mesure de la mobilisation des financements et de l'engagement des acteurs locaux (Figure 2). Seuls les départements de la Corse et la Haute-Loire ne sont actuellement pas totalement intégrés à la base de données nationale.

Le volet CPF s'est poursuivi avec la cartographie systématique au 1/50 000 de quelques territoires (ex : Seine-et-Marne, Loiret). Ponctuellement, des cartes ont été initiées sur des secteurs avec une finalité locale très appliquée (potentiel agronomique, documents d'urbanisme, gestion foncière...). Ce volet a surtout visé la finalisation de cartes à 1/100 000 (Langon, Besançon, Angers, Laon...) et l'informatisation de cartes existantes. Un travail très important de numérisation et de mise en base de données des études anciennes a été engagé pour archiver ces données et les rendre disponibles et exploitables. A noter que ce volet CPF a aussi permis de soutenir le volet RRP, en enrichissant la connaissance des lois de distribution des sols et les bases de données dans certains secteurs qui étaient peu couverts par les RRP.

Figure 2. Progression de l'avancement des RRP entre 1992 et fin 2024

Figure 2. Evolution of RRP between 1992 and end of 2024



Le volet secteurs de référence a été peu développé compte-tenu de la priorité donnée aux RRP, même si quelques thématiques ont été couvertes comme par exemple, les techniques culturales simplifiées ou encore la gestion quantitative et qualitative de l'eau.

Les acteurs clés

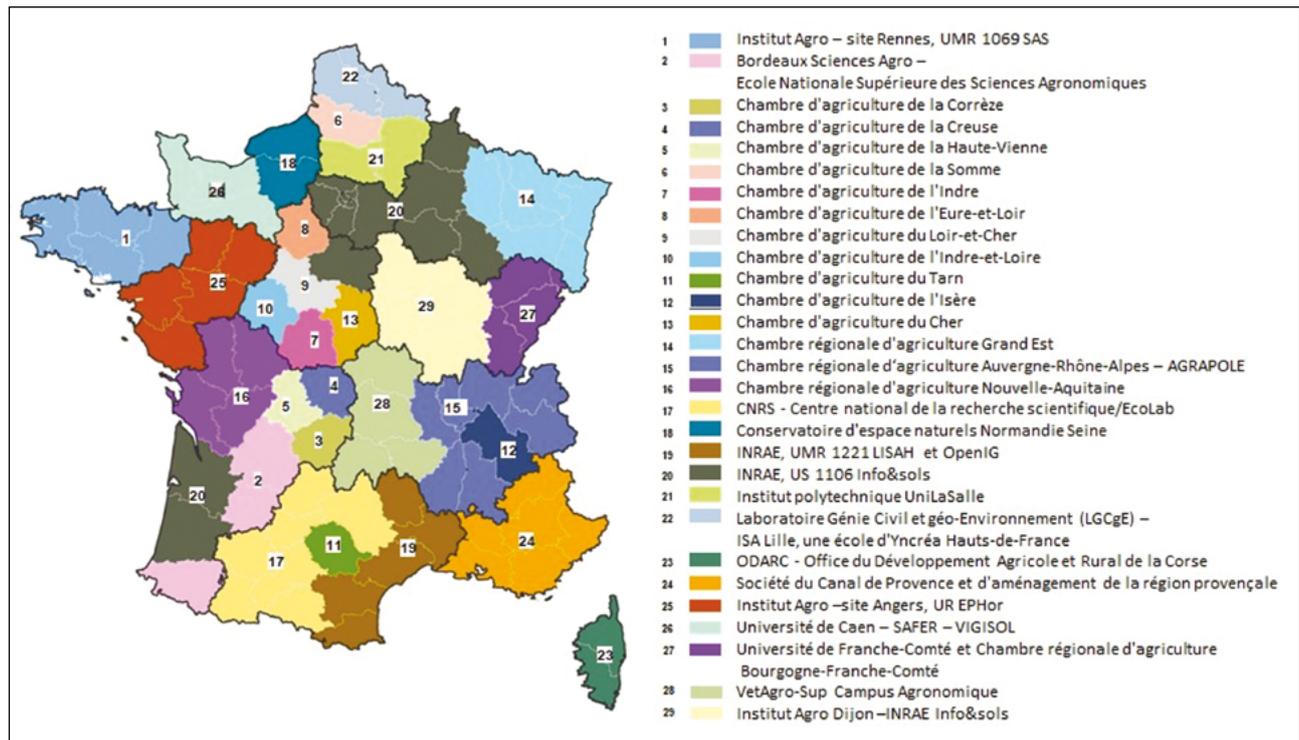
Le programme IGCS est coordonné et piloté par un Conseil scientifique. Les principaux acteurs sont des partenaires locaux qui ont porté ou portent des projets sur leur territoire. Lors du démarrage, seules étaient impliquées des unités INRA notamment pour la mise en place et le test de la méthodologie nationale, par exemple, sur le Languedoc-Roussillon (Bornand *et al.*, 1994) ou le Loiret (Arrouays, 1989). Cette maîtrise d'ouvrage a été ensuite confiée à des partenaires historiquement impliqués dans la cartographie des sols (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, chambres d'agriculture, Société du Canal de Provence), puis s'est élargie à de nouvelles chambres d'agriculture, aux écoles supérieures d'agronomie (Bordeaux SciencesAgro, Institut Agro, VETAGROSup, ENSAT) et à des associations comme l'ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace). Le nombre et la diversité des organismes (Figure 3) se sont accrus, avec par exemple l'implication de la SAFER en ex Basse-Normandie ou encore

du Conservatoire d'espaces naturels en ex Haute-Normandie. Depuis 2007, les partenaires régionaux et l'INRA se sont organisés au sein du RMT Sols et Territoires (<https://sols-et-territoires.org/>), partenaire privilégié pour contribuer à l'utilisation et la diffusion des données (Bispo *et al.*, 2021c). L'animation nationale et le suivi au quotidien du programme sont à la charge de l'unité Info&Sols d'INRAE.

Le programme est principalement financé par le ministère en charge de l'Agriculture (250 k€/an resté constant depuis la création du Gis Sol), complété par INRAE au titre de ses missions complémentaires (50 k€/an). D'autres financeurs tels que les régions, les agences de l'eau, les collectivités territoriales, l'Europe participent également, les partenaires apportant souvent de l'autofinancement.

Les principales étapes

Afin de garantir la qualité des données collectées, des procédures de contrôle des informations ont été mises en place, au travers du développement de SIVERCOH (Système d'Information de VÉRification de la COhérence des bases de données relationnelles) en 2012 (Chapuis *et al.*, 2012), qui automatise une partie des vérifications, complétées par une expertise. Ce protocole permet d'attribuer à chaque RRP un niveau de qualité. À ce jour, 65 des 78 RRP sont qualifiés d'un

Figure 3. Liste des partenaires du programme IGCS**Figure 3.** List of IGCS partners

niveau de qualité, suivant 3 niveaux, selon les préconisations du cahier des charges. Ce dernier a été mis à jour en 2014 et est disponible sur le site du GIS Sol (https://www.gissol.fr/wp-content/uploads/2019/03/CCTG_RRP.pdf).

La démocratisation des SIG (systèmes d'information géographique), la disponibilité d'informations externes de plus en plus nombreuses, de fiabilité et de résolution grandissantes marquent des évolutions majeures. Ces outils sont essentiels aujourd'hui pour pré-délimiter des unités de sol mais aussi pour identifier les sols au travers de la Cartographie des Sols à Modélisation Statistique (CSMS ou *Digital Soil Mapping*) (Lagacherie *et al.*, 2007 ; Lagacherie *et al.*, 2013). Ils permettent de prédire des types de sols ou des propriétés de sols, associées à une incertitude, sur de grands territoires (Arrouays *et al.*, 2017). Les évolutions de l'offre et de la demande en données sol ainsi que le développement de la CSMS ont conduit, en 2015, le Conseil Scientifique d'IGCS et le RMT « Sols et Territoires » à s'interroger sur l'évolution souhaitable des objectifs, démarche et organisation de la cartographie des sols en France. Des publications marquantes font état des besoins en données sol, du développement et de l'organisation des programmes de cartographie, d'une analyse prospective des scénarios potentiels d'évolution aux plans technique et organisationnel (Voltz *et al.*, 2018 ; Richer-de-Forges *et al.*, 2019 ; Voltz *et al.*, 2020) montrant le dynamisme et la force de proposition de la France sur ce plan.

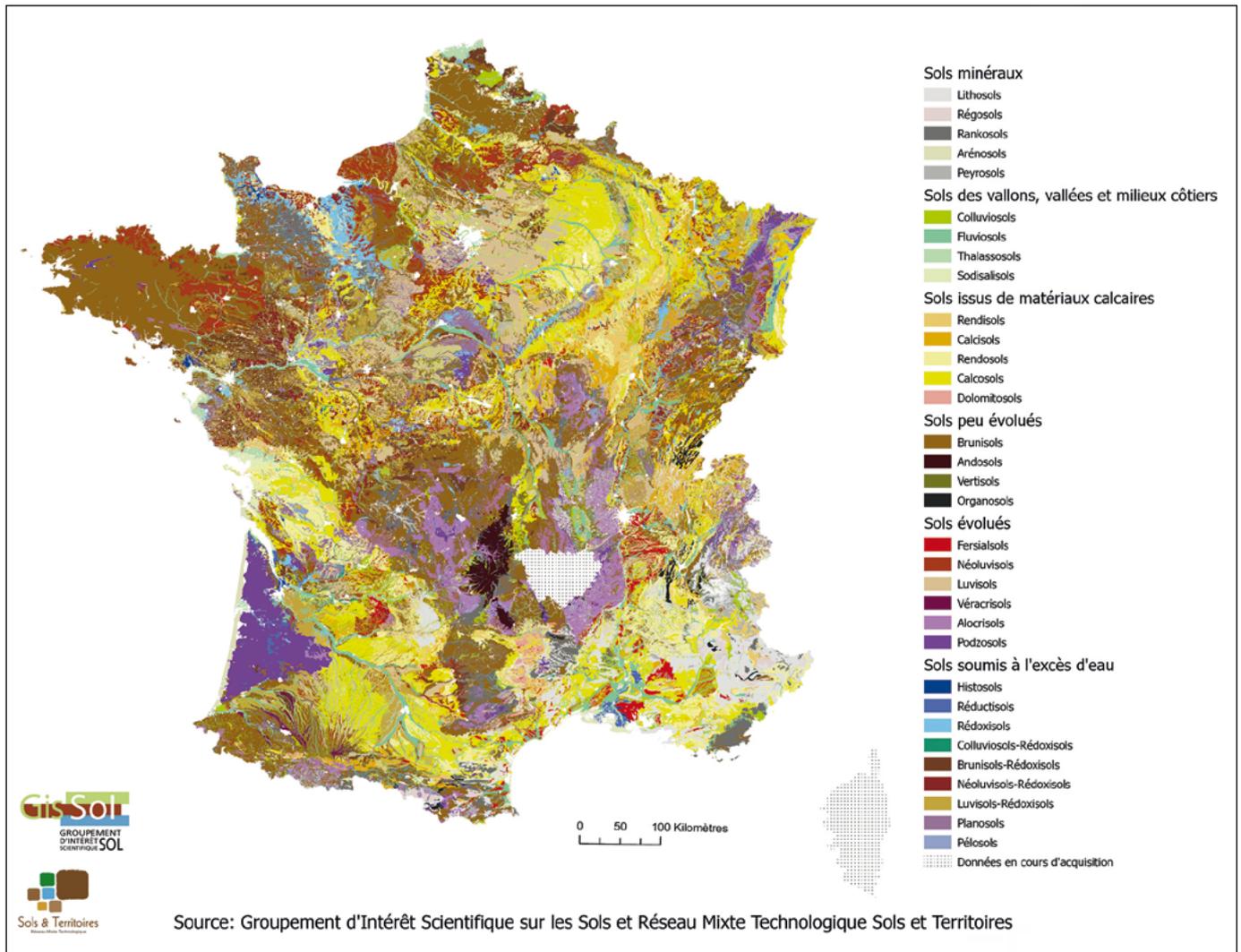
Les réussites

La centralisation de l'information pédologique est une première réussite du programme. Le format DoneSol est aujourd'hui reconnu par tous les partenaires comme le format national des données sur les sols, la base de données s'enrichit ainsi continuellement. La capitalisation des données anciennes « dormantes » et de nouvelles acquises issues de divers projets soutenus par les appels à projets IGCS et CPF ont contribué, comme développé ci-dessus, à la finalisation et numérisation de cartes à 1/100 000, à la cartographie systématique au 1/50 000 de quelques territoires, et au démarrage de cartes sur des secteurs avec une finalité locale très appliquée. Des formations à DoneSol ont notamment été mises en place, ainsi que des ateliers systématiques de saisies de données anciennes qui risquaient d'être perdues. Ce programme a aussi permis de créer, faire vivre et d'amplifier un réseau d'acteurs contributeurs à l'acquisition des données mais également d'acteurs, utilisateurs des données. Ce réseau est entretenu par des séminaires biannuels du programme IGCS et la dynamique du RMT Sols et Territoires.

Après plus de 25 ans de travail, la quasi-finalisation des Référentiels Régionaux Pédologiques, est à mettre au crédit de ce programme (*Figure 2*). Cette réalisation, plus lente que prévue, est pour partie due à une mobilisation difficile de structures locales, prêtes à s'investir et disposant des compétences

Figure 4. Carte des types de sols dominants accessible sur le géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols/>) dernier accès 20/02/2024

Figure 4. Maps of dominant soil types available at the French Geoportal website (<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols/>) last access 04/28/2023



nécessaires, elle-même liée à la difficulté d'obtention des crédits nécessaires autres que nationaux. Aujourd'hui 95 % du territoire métropolitain est couvert à 1/250 000. La carte des sols dominants, synthèse de cette cartographie, est publiée sur le Géoportail national (Messant *et al.*, 2021) (Figure 4). Un travail est en cours pour construire une carte harmonisée nationale à 1/250 000.

Toutes ces données ont été mobilisées pour une opération nationale exemplaire, à savoir la révision des zones défavorisées. Commandée par l'Union européenne à chaque Etat membre, dans le cadre des aides PAC, l'objectif de cette révision était de revoir les communes classées au titre du handicap naturel (<https://agriculture.gouv.fr/aides-aux-exploitations-classement-en-zone->

defavorisee). Huit critères définis par l'Union européenne étaient directement liés au sol, nécessitant de disposer d'une couverture homogène sur le territoire national. Outre le fait que c'était une des premières valorisations dans le cadre d'un appui aux politiques publiques, ce zonage a également permis de tester les procédures de mobilisation des données et de mobiliser des crédits complémentaires pour accélérer la cartographie des RRP. Ces données ont été utilisées dans différents cadres, et notamment afin de définir la multifonctionnalité des sols dans les espaces péri-urbains (Projet MUSE (<https://www.cerema.fr/fr/actualites/projet-muse-integrer-multifonctionnalite-sols-documents>)).

Quelques pistes pour l'avenir

Les principales ambitions sont en partie issues du travail de prospective réalisé par le CS IGCS, le RMT Sols et Territoires et des experts associés (Voltz *et al.*, 2018, 2020). Les RRP seuls sont aujourd'hui insuffisants pour répondre aux différents enjeux sur les sols, notamment ceux qui sont très locaux (aménagement du territoire, agroécologie et agriculture de précision, gestion sylvicole, protection des ressources...). Il s'agit de les enrichir à travers la capitalisation de données anciennes et l'acquisition de nouvelles informations sur les sols.

De nombreuses données acquises lors d'études diverses échappent au système d'information malgré les communications répétées auprès des réseaux existants ou lors de différentes manifestations (Le Bas *et al.*, 2022 ; Bispo et Laroche, 2022 ; Le Bas *et al.*, 2019). Ces informations pourraient aisément être capitalisées en l'imposant dans les cahiers des charges émis par les donneurs d'ordre (collectivités, agences de l'eau, services déconcentrés de l'état, INRAP...). Cette capitalisation doit être faite dans le cadre national normalisé, celui de DoneSol. Les conséquences d'un tel enrichissement seraient de faire progresser la densité spatiale des observations et d'augmenter la précision des prédictions.

De nouveaux capteurs déployés en agriculture et/ou issues de la télédétection (proche ou lointaine) vont également fournir de nouvelles sources de données. Les méthodes et outils de la CSMS ont besoin de s'appuyer sur des données de terrain, mais aussi de données issues de capteurs divers couvrant de larges surfaces (données de spectrométrie par drones, aéroportées ou satellitaires). La démonstration de la faisabilité et de l'apport de l'utilisation de ces données spectrométriques spatiales et temporelles a déjà été réalisée sur de nombreux cas d'étude (Vaudour *et al.*, 2022). Il reste à transférer ce savoir-faire au-delà de la recherche et à le rendre opérationnel auprès des partenaires régionaux ou plus locaux (Richer-de-Forges *et al.*, 2022).

Les sciences participatives constituent un nouveau mode d'enrichissement de la connaissance sur les sols (Ranjard *et al.*, 2022) mais qui nécessite de s'assurer de la qualité des données, de développer des procédures de validation adaptées, et de gérer et utiliser différentes bases très hétérogènes.

Au-delà de la finalisation des RRP et d'une poursuite des efforts aux échelles plus grandes, la diffusion des données constitue un enjeu fort. Des enquêtes successives auprès des utilisateurs ont montré le manque de notoriété des « produits » IGCS. L'un des objectifs est aujourd'hui d'amplifier la diffusion et la valorisation des données acquises depuis plus de 60 ans, en lien étroit avec les partenaires régionaux, notamment à travers le RMT Sols et Territoires, de façon à aller vers la mise à disposition des données les plus harmonisées et les plus « ouvertes » possibles, en cohérence avec les aspects juridiques, les droits et devoirs en matière de diffusion des données d'inventaire. Cependant la conviction que le sol est une ressource

patrimoniale dont les informations doivent être accessible à tous n'est encore pas inscrite dans le droit, ce qui complique l'accès aux données. Par ailleurs, les modalités de diffusion des données évoluent avec l'open data et l'existence de produits cartographiques gratuits européens ou mondiaux, issus de la cartographie numérique sur les sols sur des étendues beaucoup plus larges et dérivés de données et de co-variables beaucoup moins précises (e.g., Orgiazzi *et al.*, 2018 ; Poggio *et al.*, 2021). Plusieurs partenaires expriment des craintes sur la non prise en compte de leur forte incertitude (Loiseau *et al.*, 2020 ; Lemercier *et al.*, 2022), ainsi que sur la maîtrise technique de l'utilisation de telles données et des produits résultants. Ils ont également l'impression de ne pas avoir un retour sur investissement, compte tenu du temps nécessaire pour acquérir et qualifier leurs données. Cette diffusion doit donc s'accompagner d'une information précise sur les métadonnées et d'un appui aux utilisateurs (formation, expertise...), avec le relai du RMT Sols et Territoires et du Domaine d'Expertise Scientifique « cartographie numérique des sols » (DES-CNS) du pôle Theia (Richer-de-Forges *et al.*, 2022). L'avenir doit s'envisager sous la forme d'un portail national d'accès aux données, avec des procédures homogénéisées et transparentes, en phase avec les besoins des utilisateurs pour adapter l'offre à leur demande. Un enjeu important porte sur l'accompagnement et l'appropriation des données par un grand nombre d'acteurs, aux demandes croissantes. Des travaux avec d'autres structures (AFES, RNEST...) sont en cours pour que les mentalités évoluent, que la plus-value ne soit plus seulement portée sur la donnée elle-même, mais sur les services et l'expertise que le spécialiste peut apporter en la fournissant.

Même après de nombreuses années d'existence, le réseau reste fragile, dépendant de l'engagement des structures et des moyens mobilisés. Le maintien des compétences de pédologues en régions est un réel enjeu dans le futur, du fait d'une vague de départs en retraite ces dernières années, des renouvellements positionnés sur d'autres missions, et donc moins disponibles pour des études pédologiques. Conforter un réseau d'experts, organiser des échanges d'expériences, développer la formation, proposer des méthodes de validation des données collectées et des produits fournis sont des éléments importants de la pérennité du programme. De nouvelles méthodes, renforcées par des informations de plus en plus précises et performantes, requièrent la mise en réseau, l'accompagnement et la formation des utilisateurs à la CSMS, pour l'appropriation de ces techniques (construction de méthodes, validation des produits), pour leur compréhension et leur appropriation de tous produits fournis (format, incertitudes, résolution...).

du sol. Ces échantillons sont prélevés à la tarière hélicoïdale dans la couche de surface (0-30 cm) ou au sein de la couche labourée, puis dans la couche de sub-surface (30-50 cm).

Une enquête est réalisée auprès des propriétaires/gestionnaires/exploitants avant chaque intervention sur site. Elle a pour objectif de recueillir des informations sur l'historique et la gestion passée et actuelle de la parcelle. Le RMQS, et c'est une originalité par rapport à d'autres dispositifs dans le monde, renseigne simultanément les sols, leurs usages et les pratiques associées (Bouvais *et al.*, 2022). En parallèle, un conservatoire des échantillons, « mémoire » des sols de France, a été mis en place, afin de pouvoir réaliser de nouvelles analyses en plus du menu initial (Ratié *et al.*, 2010).

Les acteurs clés

La mise en œuvre des campagnes est coordonnée par l'Unité Info&Sols et réalisée, comme pour le programme IGCS, avec la participation de partenaires régionaux, sollicités pour leurs compétences en pédologie (chambres d'agriculture, instituts de recherche, établissements d'enseignement supérieur, associations, bureaux d'études...) (Figure 5). Le conservatoire européen d'échantillons de sols (CEES) et les différents laboratoires d'analyse sont des partenaires

indispensables. Le CEES réceptionne, vérifie et prépare les échantillons de sols pour conservation en conditions contrôlées et leur distribution aux laboratoires d'analyse. Les laboratoires INRAE d'Arras (LAS), de Versailles-Saclay (BioChemEnv) et de Dijon (AgroEcologie) réalisent respectivement les analyses physico-chimiques, d'activités enzymatiques et de diversité des bactéries et des champignons.

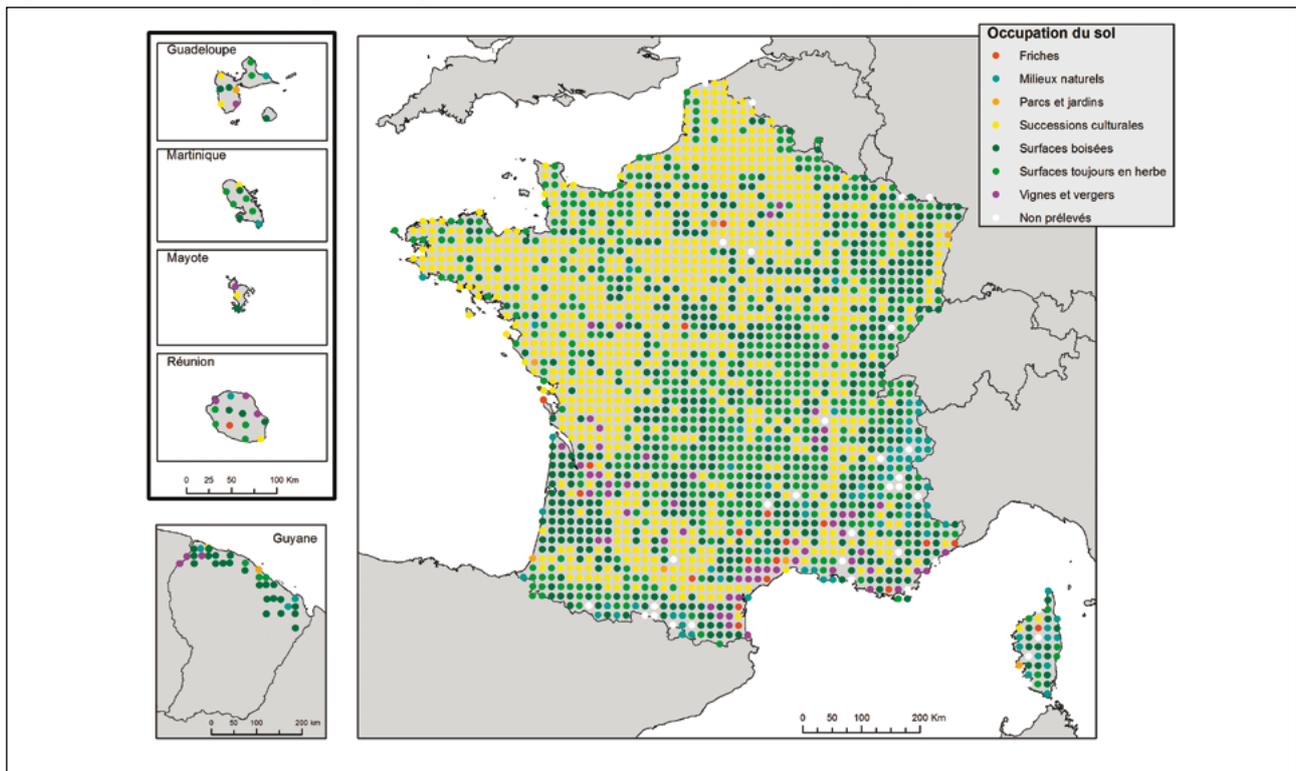
Les principales étapes et grandes avancées

Actuellement, le réseau RMQS repose sur le suivi de 2 240 sites répartis uniformément sur le territoire français métropolitain et ultra-marin (Figure 6). En métropole, la première campagne s'est déroulée entre 2000 et 2009 et a permis d'acquérir des références sur les propriétés des sols sur 2 173 points. Dans les territoires ultra-marins, cette première campagne, achevée en 2015, couvre 67 sites, répartis sur les Antilles, la Réunion, Mayotte et la frange côtière de la Guyane.

Cette première campagne a visé principalement à caractériser les sols de France, avec des paramètres utiles à la production agricole, mais aussi répondant à divers enjeux tels que le changement climatique (stocks de carbone) et la santé (contamination des sols). Elle s'est déroulée région par région. Les réflexions sur le lancement de la deuxième

Figure 6. Le Réseau de mesures de la qualité des sols : répartition des sites et occupations du sol (RMQS1)

Figure 6. The French Soil Quality Monitoring Network: sites distribution and land-uses (RMQS1)



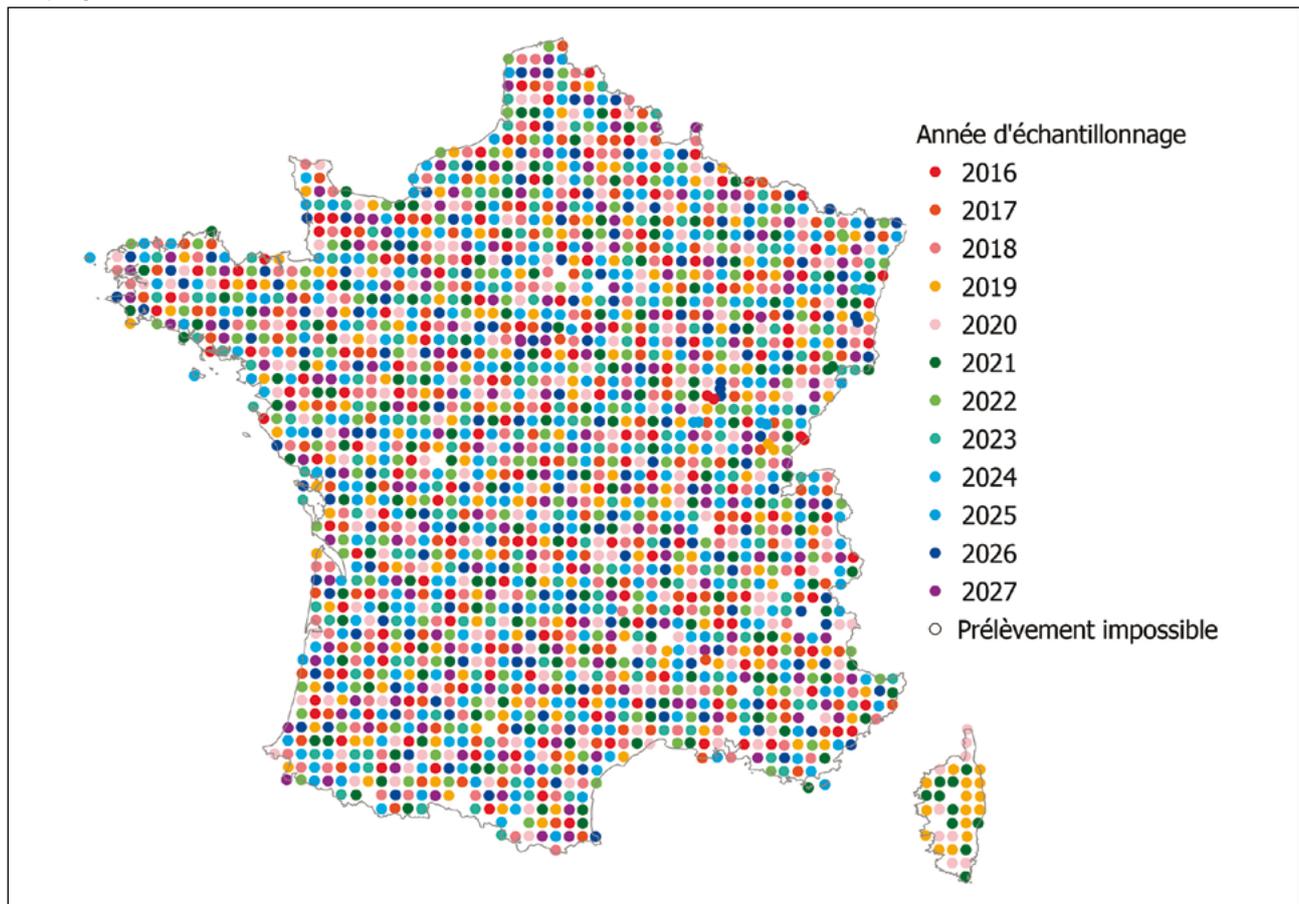
campagne (RMQS2) ont démarré avant même la fin de la première afin de définir les paramètres à mesurer et les budgets nécessaires. La stratégie d'échantillonnage a également été révisée pour être en mesure de détecter rapidement des évolutions relatives à l'ensemble du territoire et pour disposer annuellement de résultats permettant des estimations non biaisées des paramètres statistiques à l'échelle nationale, tout en respectant des contraintes budgétaires annuelles. Ainsi, au lieu d'échantillonner successivement les régions en un ou deux ans (RMQS1), un panel de 180 sites répartis sur toute la France est tiré au sort, et échantillonné chaque année. La bonne répartition spatiale du panel de sites est assurée par la définition de strates au sein desquelles un site est sélectionné au hasard chaque année. Ces strates correspondent à un regroupement spatial de 12 cellules RMQS adjacentes. Au nombre de 180 au total pour le territoire, ces strates permettent de répartir les 12 années nécessaires pour couvrir l'ensemble du territoire (RMQS2). Dans la *figure 7*, les sites prévus par l'algorithme pour chaque année

de prélèvement sont présentés afin de se rendre compte de leur répartition homogène. A partir de résultats de simulations de changements en teneurs en carbone déjà observés dans la littérature, une étude statistique a permis de vérifier que le temps nécessaire à leur démonstration statistique était compatible avec les objectifs du réseau (Bourgeois *et al.*, 2012 ; Swiderski *et al.*, 2017).

Compte tenu des faibles flux de contamination diffuse des sols en éléments traces métalliques, l'analyse des paramètres associés n'a pas été jugée prioritaire pour le RMQS2 (Belon *et al.*, 2012). L'évaluation des stocks de carbone des sols et la cartographie de la biomasse microbienne des sols ont été reconduites afin d'estimer des évolutions entre les deux campagnes. De nouveaux paramètres, fondés sur de nouveaux prélèvements, ont été ajoutés dans le contexte de changement climatique (réservoir utile, matières organiques particulières, stocks de carbone profonds). Les dispositifs et les protocoles sont globalement identiques à ceux de la première campagne,

Figure 7. Stratégie d'échantillonnage pour la détection précoce d'évolutions et la réalisation de statistiques nationales annuelles non-biaisées : l'échantillonnage annualisé de RMQS 2

Figure 7. Sampling strategy for detecting temporal trends and estimating annual unbiased statistical values: a progressive annual sampling of RMQS2 over France



hormis l'ajout de prélèvements d'échantillons composites en profondeur (jusqu'à un mètre) et de mesures physiques complémentaires sur 25 % des sites. La deuxième campagne a démarré en 2016 et suit le calendrier prévu, en dépit de la crise sanitaire, grâce à la mobilisation des équipes INRAE et des partenaires régionaux. Ainsi, 1 640 sites sur 2 173 ont d'ores et déjà été échantillonnés en métropole. Par manque de personnel permanent au CEES et suite à la crise sanitaire, les échantillons collectés sur le terrain ont été séchés et préparés pour garantir leur conservation, mais la préparation pour analyse (émottage et tamisage) a été retardée. Fin 2023, les analyses des échantillons des années 2016 et 2017 étaient disponibles. Ceux de l'année 2018 sont en cours d'analyse. Ce retard ne pourra être rattrapé qu'avec le recrutement de personnel permanent.

Les réussites

La première réussite importante est d'avoir été en mesure de terminer la première campagne : la France dispose ainsi d'un ensemble d'observations très riches permettant de faire un premier état de la qualité de sols. Le déploiement du RMQS, initialement prévu sur 5 ans, a mis 9 ans en métropole auxquels il faut ajouter 6 ans pour couvrir les Antilles, La Réunion, Mayotte et la bande côtière de la Guyane. La deuxième réussite notable est d'avoir construit et fédéré un réseau d'acteurs de terrain, pédologues et opérateurs, qui appliquent depuis plus de vingt ans les protocoles du RMQS, garantissant ainsi une qualité et une homogénéité de la collecte de données. Ce faisant, le RMQS est progressivement devenu un programme aux vertus pédagogiques et aux pratiques qualifiantes, utilisé pour des formations universitaires mais aussi dans un cadre professionnalisant (Oliva, Rigou, et Hatet 2023). Le réseau s'est élargi aux laboratoires qui réalisent les analyses de sol (LAS INRAE Arras, Génosol INRAE Dijon, BioChemEnv INRAE Versailles, Laboratoire de physique du sol et CEES INRAE Orléans) et à l'ensemble des chercheurs qui utilisent les données et les échantillons du RMQS ou sont à l'origine de nouvelles données. La troisième réussite du RMQS s'articule autour du Conservatoire européen des échantillons de sols qui a été créé au départ dans un hangar pour archiver les échantillons du RMQS. Ce conservatoire représente aujourd'hui une infrastructure de premier plan, construite dans un bâtiment en terre crue, pour la conservation et la mise à disposition de dizaines de milliers d'échantillons de sols patrimoniaux issus du RMQS, d'IGCS, du programme européen Integrated Carbon Observation System (ICOS) ainsi que les échantillons historiques de l'essai des 42 parcelles de Versailles. Ce conservatoire joue bien son rôle en permettant régulièrement l'analyse *a posteriori* d'échantillons archivés.

La première campagne a été la base de la publication du rapport sur l'état des sols de France (Antoni *et al.*, 2011) et de nombreuses autres publications (Mason *et al.*, 2023) avec parfois des premières mondiales, sur la biodiversité des sols

(Dequiedt *et al.*, 2011 ; Horrigue *et al.*, 2016 ; Terrat *et al.*, 2017 ; Karimi *et al.*, 2018a, 2018b ; Dequiedt *et al.*, 2020 ; Imbert *et al.*, 2021), la contamination des sols (Saby *et al.*, 2009, 2011 ; Orton *et al.*, 2013 ; Marchant, Saby, et Arrouays, 2017 ; Antoni *et al.*, 2019 ; Froger *et al.*, 2021) et les stocks de carbone et le potentiel de stockage (Meersmans *et al.*, 2012, 2013 ; Chen *et al.*, 2018, 2019 ; Martin *et al.*, 2019a, 2024). Les données collectées ont servi de référence à plusieurs politiques nationales telles que le protocole de Kyoto pour l'estimation nationale des stocks de carbone en fonction des usages (Martin, 2018 ; Martin *et al.* 2019b) et l'évaluation des stocks de carbone (Pellerin *et al.*, 2021), la proposition de valeurs de références pour l'investigation des sols pollués et leur décontamination (ADEME et Groupe de travail sur les valeurs de fonds, 2018), l'établissement de valeurs de références pour le Cadmium en lien avec la santé (Carne *et al.*, 2021) ou encore la stratégie nationale biodiversité (« Évolution de la biodiversité bactérienne des sols | naturefrance » s. d.¹ ; Imbert *et al.*, 2024).

Au-delà des nombreux jeux de données produits et diffusés, des publications réalisées (Institut National de La Recherche Agronomique *et al.*, 2021 ; Saby *et al.*, 2018 ; Martin *et al.*, 2019b), le RMQS s'est imposé comme le réseau national sur lequel se sont ajoutés des projets et des programmes d'envergure visant à caractériser l'état du milieu terrestre. Ainsi, en 20 ans, ce sont plus d'une soixantaine de projets (*Figure 8*) qui ont utilisé la logistique et les infrastructures mises en place dans le cadre du RMQS. Visible, connu et reconnu pour son excellence, l'organisation et les travaux du RMQS sont régulièrement présentés dans les instances européennes et internationales (Bispo *et al.*, 2021b ; Arrouays *et al.*, 2023).

Quelques pistes pour l'avenir

Les principales ambitions pour le RMQS sont de poursuivre l'enrichissement des variables mesurées pour être en capacité de répondre à l'ensemble des enjeux concernant la qualité des sols, de renforcer le réseau dans les Outre-mer, de développer des collaborations avec les réseaux nationaux européens et d'affirmer sa complémentarité avec le réseau de surveillance européen LUCAS Soil.

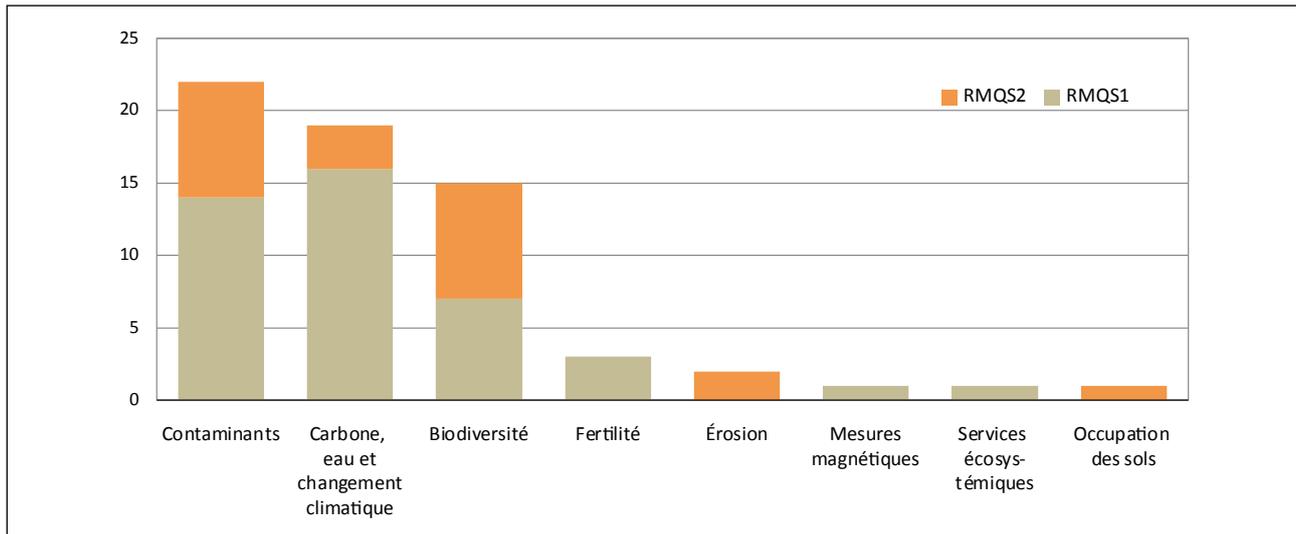
Les avancées permises grâce aux données collectées par le RMQS démontrent sans ambiguïté que ce réseau est un outil de référence incontournable pour évaluer l'état des sols à l'échelle de la France. Dès son lancement, le panel de mesures réalisées sur le RMQS avait vocation à répondre aux enjeux et de nouvelles mesures ont été ajoutées pour répondre à des questions scientifiques émergentes, utiliser des évolutions technologiques,

¹ <https://naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-biomasse-microbienne-des-sols-en-metropole>

<https://naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-biodiversite-bacterienne-des-sols>

Figure 8. Projets régionaux, nationaux et européens ayant bénéficié de l'infrastructure, des données et des échantillons du RMQS (campagnes 1 et 2) regroupés par thèmes de recherche

Figure 8. Regional, national and European projects benefiting from RMQS infrastructure, data and samples (campaigns 1 and 2) grouped by research themes



ou lorsque des mesures expérimentales devenaient accessibles à de grands échantillons. Ce fut notamment le cas des analyses microbiologiques moléculaires et d'activités enzymatiques. Cette adaptation permanente, qui accroît le champ des connaissances sur les sols et permet des croisements inédits de données à l'échelle nationale, doit être poursuivie dans les années à venir. Plusieurs nouveaux paramètres du sol sont à considérer, si possible sur l'ensemble des sites du réseau, tels que l'analyse des résidus de pesticides et le suivi de la biodiversité des sols. Deux études récentes (Froger *et al.*, 2023a ; Imbert *et al.*, 2023) ont testé et démontré la possibilité de déployer ces mesures sur l'ensemble du RMQS. Sur le volet des contaminants, une nouvelle méthode d'analyse permettrait d'obtenir un spectre complet des molécules organiques présentes dans un échantillon et de cibler les contaminants émergents tels que les perturbateurs endocriniens ou encore les PFAS. D'autres tests sont en cours sur l'évaluation de la contamination par les microplastiques (Palazot *et al.*, 2024). Sur le volet biodiversité, malgré les publications croissantes montrant une extinction massive des espèces (IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem), 2019), les sols restent l'un des compartiments les moins investigués, alors qu'ils renferment une très grande biodiversité (FAO *et al.*, 2020). Le recours aux méthodes basées sur l'analyse de l'ADN du sol sera déterminant, déjà largement utilisées pour les bactéries et les champignons du sol (Karimi *et al.*, 2018a ; Djemiel *et al.*, 2024), ces approches progressent pour la faune mais les inventaires traditionnels restent actuellement incontournables, pour collecter des données sur la phénologie ou les traits

écophysiologiques des espèces contribuant ainsi à enrichir les bases de données internationales de séquences ADN. Que ce soit sur les contaminants ou sur la biodiversité, les liens avec la santé devront être davantage développés. Plusieurs projets utilisent déjà le potentiel du RMQS pour rechercher de nouveaux antibiotiques ou caractériser les souches environnementales de bactéries botuliques. Mais on peut imaginer que les sols deviennent un nouvel horizon de recherches de molécules d'intérêt à l'instar des végétaux. Cet enrichissement progressif des données collectées par le RMQS permettra d'élaborer les indicateurs nécessaires pour évaluer et surveiller les sols dans une démarche encore plus intégratrice (Lehmann *et al.*, 2020).

En parallèle, le RMQS devra renforcer sa capacité à collecter les données de gestion et de pratiques sur ses sites, ce qui représente l'une des forces et des originalités du RMQS (Bouvais *et al.*, 2022). Ces données sont utilisées par la plupart des projets qui utilisent les données du RMQS afin d'évaluer l'impact des usages des sols, des pratiques agricoles et sylvicoles sur les paramètres suivis. Un test récent a démontré qu'un accroissement de la fréquence des enquêtes (de 15 ans actuellement à 4 ans recommandé) est nécessaire pour pouvoir reconstituer les itinéraires techniques avec la précision attendue par les modèles d'évolution des propriétés du sol.

Depuis 2006, le RMQS couvre les cinq départements ultra-marins selon les mêmes principes et objectifs que le réseau métropolitain (Brossard *et al.*, 2023). Soixante-sept sites ont été installés : 10 en Guadeloupe, 8 en Martinique, 3 à Mayotte, 13 à La Réunion et 33 sur la bande côtière de Guyane. Les menus analytiques de la première campagne RMQS ont

été appliqués aux échantillons ultra-marins. La deuxième campagne RMQS devrait être réalisée dans les territoires ultra-marins entre 2024 et 2030, afin de conserver l'écart de temps envisagé entre deux prélèvements. Or, la première campagne a montré que, dans les territoires insulaires (Antilles, Réunion, Mayotte), la faible superficie associée à une forte diversité des sols et à une forte pression d'usages rend inopérant le suivi de la qualité des sols avec un réseau de même densité qu'en métropole. Une densification du réseau devra donc être opérée dans ces territoires. Par ailleurs, certains territoires n'ont jamais été échantillonnés, comme l'intérieur de la Guyane et les collectivités : Nouvelle-Calédonie, Polynésie française, Wallis-et-Futuna, Saint-Barthélemy, Saint-Martin, Saint-Pierre-et-Miquelon et les Terres australes et antarctiques françaises, alors même que ces territoires sont confrontés à des pressions démographiques, d'exploitation minière et de changement climatique. Un état initial serait nécessaire pour évaluer l'impact de ces changements. Afin de garantir l'égalité de traitement de l'ensemble des territoires et des citoyens de la république et de répondre aux enjeux majeurs liés aux sols dans ces territoires, le RMQS devrait être étendu à l'ensemble des territoires ultra-marins. On peut en particulier penser que les terres australes et antarctiques pourraient constituer des sites exceptionnels, sorte de vigies, pour l'enregistrement de l'effet du changement climatique et de dépôts provenant de transports atmosphériques sur de très longues distances. La plupart des pays européens ont déployé depuis longtemps des réseaux de surveillance qui collectent des données sur les sols (Morvan *et al.*, 2008 ; Nicolas *et al.*, 2014). Malgré l'existence de ces réseaux, la mise en commun des données pour permettre une surveillance de la qualité des sols européens se heurte à des différences de protocoles d'échantillonnage, de méthodes d'analyses, d'accès aux données, etc (Bispo *et al.*, 2022). Pourtant les attentes de collaboration sont fortes de la part des gestionnaires de réseaux et des actions devraient être renforcées pour les développer, notamment avec le réseau de surveillance européen LUCAS Soil. Le réseau LUCAS Soil (Orgiazzi *et al.*, 2018) réalise des prélèvements de sol à des pas de temps plus rapprochés (environ tous les 5 ans) mais selon des stratégies d'échantillonnage (ex : maille, saisonnalité) et des méthodes de prélèvement (ex : profondeur, nombre de prélèvements) très différentes. De même, le RMQS fait appel à des personnels formés et qualifiés en pédologie compte tenu de la technicité du protocole national alors que le réseau européen LUCAS repose sur des préleveurs qui changent régulièrement et qui ne sont pas spécialisés sur le prélèvement de sol. Ces opérateurs interviennent par ailleurs sans autorisation préalable des exploitants ou des propriétaires, contrairement au RMQS, ce qui questionne sur la propriété des données et des échantillons collectés par LUCAS Soil. Par ailleurs les analyses sont parfois réalisées selon des protocoles différents (Bispo *et al.*, 2021a). Des travaux sont actuellement en cours pour comparer les résultats des 2 réseaux, sur un

ensemble de paramètres du sol. Les premiers résultats montrent que ces 2 sources d'informations sont complémentaires, plus que redondantes (Bispo *et al.*, 2022). En effet, le RMQS informe sur la nature du sol et sa composition en profondeur ce que ne fait pas LUCAS Soil (prélèvement seulement en surface). Les pratiques de gestion des sols sont enregistrées dans le cas du RMQS lors des enquêtes auprès des exploitants ou des propriétaires des sols alors que seul l'usage des sols est collecté pour les campagnes LUCAS Soil (pas d'échange avec les exploitants ou propriétaires). L'information est donc plus riche sur le RMQS mais la fréquence de passage moindre car plusieurs campagnes LUCAS ont été réalisées ce qui permet un suivi temporel, sur un nombre important de sites. Les stratégies spatiales d'échantillonnages diffèrent profondément, ce qui peut aboutir à des cartes ou à des conclusions différentes entre les 2 réseaux (Froger *et al.*, 2024). Il devrait être possible de proposer des stratégies d'évolution des protocoles nationaux et/ou européens afin de tirer le meilleur profit des 2 réseaux comme cela est suggéré dans le projet de directive européenne sur la surveillance des sols (Directorate-General for Environment, 2023).

4. LA BASE DE DONNÉES DES ANALYSES DE TERRE (PROGRAMME BDAT)

L'activité agricole génère plus de 200 000 analyses de terre par an. Ces informations sont utilisées au premier chef par les agriculteurs et les coopératives pour le pilotage de la fertilité des sols agricoles. Le programme BDAT vise à collecter et traiter ces informations dans un cadre national de surveillance de la qualité des sols. En France, ces analyses de terre sont réalisées très majoritairement par des laboratoires agréés par le Ministère en charge de l'Agriculture, garantissant la compatibilité de leurs résultats et permettant leur regroupement dans une base de données unique.

Le démarrage

La première initiative de synthèse des analyses de terre de France a été réalisée en Bretagne dans les années 80 (Leleux, Arousseau, et Roudaut, 1988). Après un lourd travail d'harmonisation, cette action a permis de capitaliser plus de 340 000 déterminations analytiques réalisées sur 71 000 échantillons et a montré la faisabilité à produire des synthèses cartographiques utilisant le découpage communal et cantonal pour agréger un grand nombre de données. Ces travaux pionniers, à une époque où les systèmes d'information géographiques n'étaient pas aussi développés qu'aujourd'hui, sont à souligner. Walter *et al.* (1995) ont ensuite compilé une nouvelle série de données pour produire une synthèse des

évolutions des teneurs en matières organiques des sols bretons. Fort de ce succès, Schwartz *et al.* (1997) et Walter *et al.* (1997) ont généralisé l'approche au territoire métropolitain dans le cadre d'un partenariat avec l'AFES, en sollicitant la participation des laboratoires du GEMAS (Groupement d'Études Méthodologiques pour l'Analyse des Sols).

Les acteurs clés

Depuis sa création, la collecte BDAT repose sur un partenariat avec des laboratoires d'analyses de sol du GEMAS ayant satisfait à une procédure d'agrément proposée par le Ministère en charge de l'Agriculture et dont la liste est fournie par arrêté publié au Journal Officiel en fin d'année civile. La participation des laboratoires est volontaire, indemnisée par une modeste compensation financière, très hétérogène au fil des années. Elle est régie par une convention précisant les modalités de transferts de données. L'adoption en 2016 du Règlement général sur la protection des données (RGPD) a entraîné une rupture des échanges et a nécessité la réécriture de cette convention afin de reprendre le partenariat (Rennes *et al.*, 2023). Le choix a été fait par les juristes INRAE de se conformer à l'article 4 de la Loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, spécifiant que le transfert de Données à Caractère Personnel à des fins de recherche scientifique entre les Laboratoires et INRAE est compatible avec les finalités initiales de la collecte de ces données, dans le respect des dispositions de l'article 89 du

règlement (UE) 2016/679 du 27 avril 2016 et de la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés. Depuis, les données ne sont plus téléchargeables pour tous, seules les cartes le sont. Un comité d'utilisateurs se réunit annuellement pour fluidifier les échanges et co-construire avec les laboratoires d'analyse les modalités de valorisation de ces données, pour la recherche, pour les laboratoires et les utilisateurs de la base de données.

Les principales étapes et grandes avancées

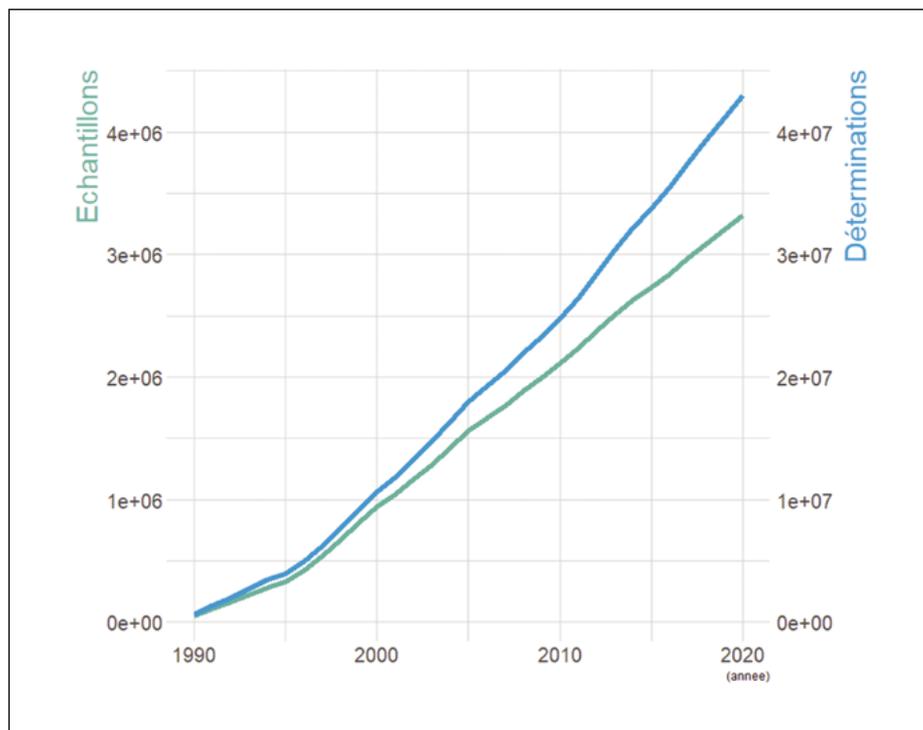
Comme le montre la *figure 9*, l'intégration du programme BDAT aux actions du GIS dans les années 2000 a permis d'accélérer la collecte de données stockées dans la base, tant en nombre d'échantillons qu'en richesse de l'information capitalisée. Cette base comporte aujourd'hui plus de 3,26 millions de lignes, correspondant à près de 42 millions de valeurs sauvegardées. Les échanges avec les laboratoires partenaires ont permis d'améliorer la qualité des données collectées au fil des années, avec un enrichissement du nombre d'analyses par échantillon et une information sur la profondeur de prélèvement des échantillons.

Les réussites du programme

Tout d'abord, les nombreux travaux réalisés lors de cette période de collecte ont démontré toute la richesse de ce type d'information. Au-delà de la description des grandes tendances

Figure 9. Evolution du nombre cumulé d'échantillons mesurés (en vert) et de paramètres (en bleu) sur les 30 ans de collecte.

Figure 9. Change in the cumulative number of samples measured (in green) and parameters (in blue) over the 30 years of collection.



des paramètres de fertilité au niveau national, les données collectées ont permis premièrement la caractérisation fine de leur variabilité intra cantonale en lien avec la diversité des sols et des systèmes de cultures français : le carbone (Saby *et al.*, 2004), les paramètres de fertilité, P, K et Mg (Follain *et al.*, 2009), le pH (Saby *et al.*, 2017). Un deuxième aspect concerne la mise en évidence d'évolutions de paramètres du sol, telles que l'augmentation généralisée des pH (Saby *et al.*, 2017), la baisse des teneurs en matière organique (Lemerrier *et al.*, 2006 ; Saby *et al.*, 2008 ; Swiderski *et al.*, 2012) ou encore la baisse des stocks de P (Lemerrier *et al.*, 2008). Dans le cadre du projet ABC'Terre soutenu par l'ADEME (Duparque *et al.*, 2016), une caractérisation de la variabilité des teneurs en carbone selon les types de sols des référentiels pédologiques a pu être mise en œuvre, grâce à une méthode innovante d'affectation des résultats de la BDAT (Scheurer *et al.*, 2016). Soulignons que tous les résultats cartographiques sont accessibles à partir d'un site internet offrant une interface qui permet à l'utilisateur de construire sa carte et de naviguer géographiquement (<https://webapps.gissol.fr/geosol/>).

Quelques pistes pour l'avenir

La BDAT pourrait bénéficier d'un appui politique plus important, par exemple en légiférant pour rendre obligatoire la réalisation d'analyses de terre de manière régulière et leur versement systématique à la base de données nationale. La sélection des parcelles échantillonnées découle principalement d'un choix individuel de l'agriculteur et n'est donc pas contrainte par un protocole national, complexifiant ainsi l'analyse statistique nationale et pouvant partiellement la biaiser, car on ne connaît pas les motivations des commanditaires. Si des analyses à un pas de temps à définir, et leur versement dans la base devenaient une condition réglementaire au versement de subventions, ce biais serait atténué. L'incertitude sur la localisation est un frein à une analyse spatiale et temporelle plus fine. La disponibilité de meilleures localisations dans le futur pourra sans doute lever ce verrou méthodologique.

5. LA BASE DE DONNÉES DES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (PROGRAMME BDETM)

Dans le cadre de la réalisation des plans d'épandage des boues de station d'épuration, de très nombreuses analyses des éléments traces métalliques (ETM) dans les sols sont effectuées sur le territoire national, conformément aux prescriptions du décret du 8 décembre 1997, complété de l'arrêté du 8 janvier 1998. Ainsi, les teneurs en sept éléments traces métalliques (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) sont déterminées sur des échantillons de sols prélevés en surface (horizons labourés) sur des parcelles

agricoles susceptibles de recevoir des épandages de boues de station d'épuration urbaine. D'autres analyses sont parfois réalisées en plus, liées à la caractérisation agro-pédologique des sols, telles que la granulométrie (3 ou 5 fractions), le pH (eau), la capacité d'échange cationique (CEC), le carbone organique ou matière organique, le calcaire total. Toutes ces analyses portent sur la « terre fine », ce qui exclut les « éléments grossiers » de diamètre supérieur à 2 mm (graviers et cailloux).

Le démarrage

Compte tenu de la fréquence et de l'abondance de ces données sur les sols, l'ADEME et l'Unité INRA de Sciences du Sol d'Orléans se sont associées, à la fin des années 90, pour collecter et traiter ces données (Deslais et Baize, 1997). A la création du GIS Sol, l'ADEME a transféré cette base de données, initialement dénommée ANADEME, au GIS Sol afin de poursuivre sa complétion et son analyse. En miroir à la BDAT, la base a été dénommée BDETM (base de données des éléments traces métalliques) (Arrouays *et al.*, 2022).

Outre les données sur les teneurs en ETM et autres paramètres agronomiques, les informations relatives aux prélèvements, lorsque disponibles, sont également collectées, comme pour la BDAT : le nom de la commune, l'organisme ayant réalisé l'étude préalable à l'épandage, l'année du prélèvement, les coordonnées géographiques précises du site de prélèvement. Des informations relatives aux analyses elles-mêmes, sont également collectées telles que l'identité du laboratoire, la date des analyses et la méthode de mise en solution utilisée pour la détermination des teneurs en ETM. Cette dernière indication est importante car l'utilisation de l'eau régale (ER) ou du mélange associant deux acides forts (HF + HClO₄) ne conduit pas au même résultat. Ainsi, les différences varient largement selon la nature des sols et le métal considéré : faibles pour Cd ; non négligeables pour Cu, Pb, Zn ; souvent importantes pour Cr et Ni. A noter que Hg et Se, étant déterminés par des méthodes spécifiques, ils ne sont pas affectés par cette opposition HF versus ER.

Les acteurs clés

Outre l'ADEME et INRAE à l'origine du projet, les organismes qui commanditent et/ou réalisent ces analyses dans le cadre du recyclage des boues résiduelles de stations d'épuration ont fourni les données. Il s'agit d'organismes publics et privés tels que des maîtres d'ouvrage (collectivités), des maîtres d'œuvre (bureaux d'étude et chambres d'agriculture), des services instructeurs (DDT), des agences de l'eau et divers organismes de suivi (chambres d'agriculture, SATESE). Réunir ces analyses a nécessité de solliciter tous ces organismes dont les rôles peuvent être différents en fonction des départements et des régions.

Les principales étapes et grandes avancées

Les données de la base BDETM sont issues de deux collectes nationales financées par l'ADEME et réalisées par INRAE. La première collecte de résultats d'analyses, effectuée en 1997 et 1998, a permis de recueillir des analyses pour 11 396 sites provenant principalement d'une trentaine de départements métropolitains (Baize *et al.*, 2006). La seconde collecte s'est déroulée de novembre 2008 à janvier 2010 (Duigou *et al.*, 2011 ; Duigou et Baize, 2012), réalisée selon les mêmes principes que la première, mais avec de plus grands moyens informatiques. Le nombre de sites, très faible initialement, a lentement augmenté jusqu'en 1998, puis a doublé entre 1998 et 1999 et n'a pas cessé d'augmenter jusqu'en 2006 (Figure 10). Cette évolution peut s'expliquer par la mise en place en 1998 de la réglementation relative aux plans d'épandage de boues d'épuration. Cette législation a permis d'encadrer les pratiques de recyclage agricole des boues et ainsi d'établir un climat de confiance entre les producteurs de boues et les agriculteurs.

La base ainsi constituée inclut les données des 2 campagnes, soit plus de 73 400 sites, subdivisées en deux sous-populations (selon la méthode de mise en solution). Pour la seconde campagne, les données géo-référencées ont été acquises, sous couvert de confidentialité (la localisation des prélèvements ne devant pas être accessibles dans la restitution finale). Ces données ont été vérifiées, validées et traitées, afin de produire des informations statistiques sur les concentrations en ETM des sols agricoles pour les 79 départements et 232 régions agricoles de l'INSEE pour lesquels la densité de l'information a été jugée suffisante (Figure 11). La répartition des sites n'est pas homogène sur le territoire, traduisant le caractère non supervisé de l'échantillonnage. Étant donné l'origine des analyses, le jeu de données porte principalement sur des sols agricoles situés en positions planes.

Cette base compile des analyses correspondant à des échantillons prélevés par des dizaines d'opérateurs différents, opérés par plus de 70 laboratoires. Il en résulte une base assez hétérogène en termes de données et de méthodes d'analyse, mais qui représente assez bien les sols des régions de grandes cultures, avec des échantillons dont la concentration en ETM est très proche des « fonds pédo-géochimiques naturels locaux » (prairies non ou peu fertilisées), un grand nombre d'échantillons avec des teneurs habituelles pour des usages agricoles, et un certain nombre d'échantillons pouvant être considérés comme notablement ou fortement pollués.

Les réussites du programme

Ces travaux ont permis de mieux connaître la distribution des concentrations en éléments traces métalliques dans les sols de grandes cultures en France, et d'avoir une image de leur répartition spatiale. Des statistiques nationales, départementales et par région agricole ainsi que des cartes (Figure 11) ont été produites. Les connaissances sur les fonds pédo-géochimiques en ETM a ainsi nettement progressé en France.

Quelques pistes pour l'avenir

La dernière collecte d'information date de la fin des années 2000 et un nouveau projet, cofinancé en 2022 par l'ADEME, vise à rassembler les nouvelles analyses réalisées, compléter leur interprétation et accroître leur diffusion. Ce dernier point est capital car si les résultats de la BDETM ont été mis à disposition du public, à travers par exemple des *webservices* et des *datasets* (<https://doi.org/10.15454/4GNNOS>). Un outil de consultation² de ces données a été récemment développé pour

2 <https://shiny.dev.gissol.fr/sp-bdetm/app/bdetm>

Figure 10. Nombre de sites collectés par année (de 1983 à 2009)

Figure 10. Number of samples per year (from 1983 to 2009)

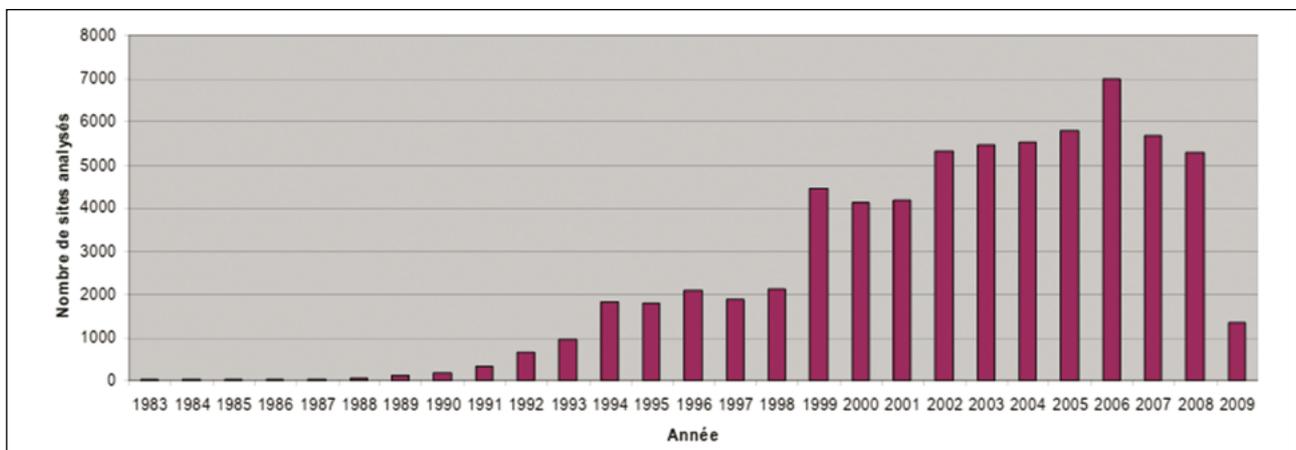
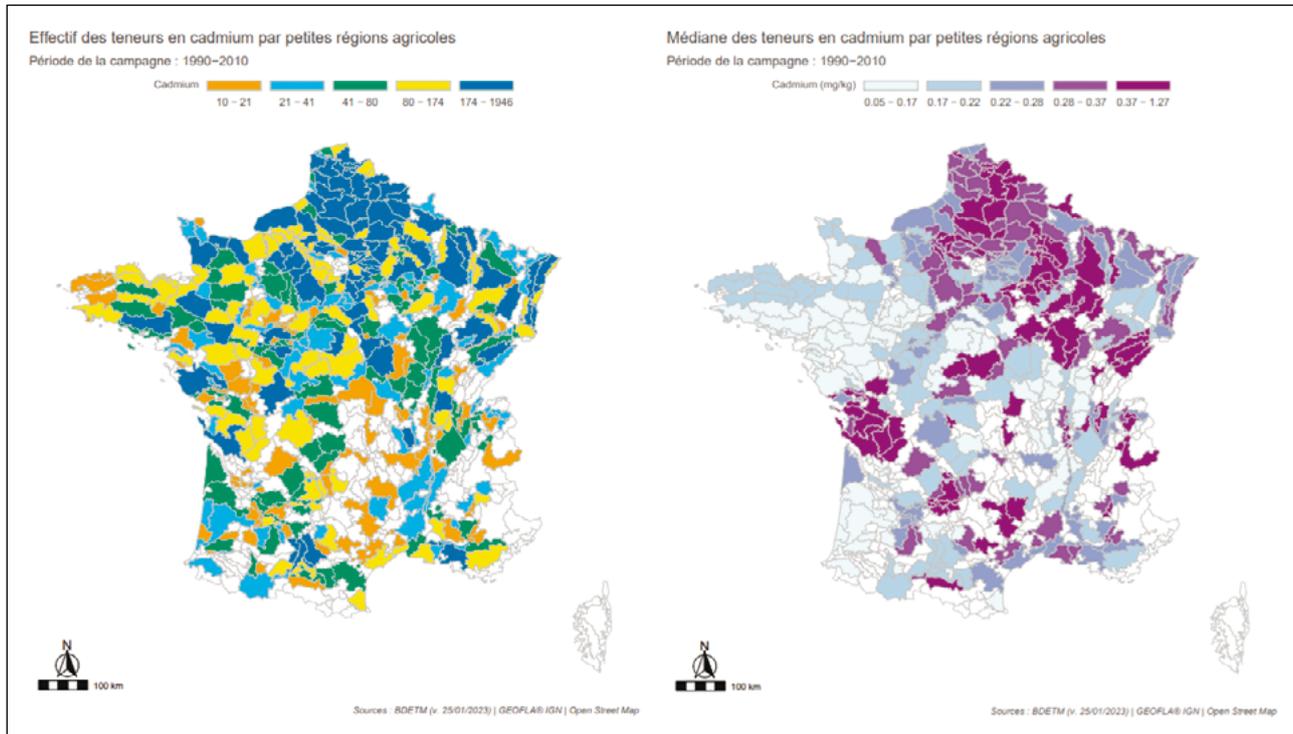


Figure 11. Résultat de la BDETM pour les 2 périodes de collecte : a) Nombre de site d'analyses de la BDETM par département ; b) Médianes des teneurs en cadmium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) par région agricole (extractions ER et HF + HClO_4 considérées)
(NB : les zones en blanc sur la carte correspondent à des surfaces où les données sont absentes ou trop peu nombreuses pour calculer des médianes)

Figure 11. Results from BDETM considering the 2 collecting periods: a) samples number per department; b) as example, median of cadmium concentrations ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) per agricultural area (ER and HF + HClO_4 digestion methods considered)
(NB: blank areas on the map are linked to a lack of data or too few data to calculate medians)



déterminer par exemple les fonds pédo-géochimiques, appuyer la gestion des sites pollués ou des terres excavées, aider à la gestion des matières fertilisantes, ou plus largement, pour aménager le territoire. A plus long terme, il s'agit également de réfléchir à une automatisation de la collecte de ces données en ayant des accords avec les organismes producteurs et/ou détenteurs de ces données. En matière de recherche, il serait intéressant de comparer les données statistiques et les cartes issues du RMQS et de la BDETM, en considérant toutes les limites précédemment évoquées.

6. LA BASE DE DONNÉES DES ANALYSES DE SOLS URBAINS (PROGRAMME BDSOLU)

(BRGM, 2022a)

Le démarrage

Dans un contexte de croissance du taux de population vivant en ville, la connaissance de la qualité chimique des sols en milieu urbain devient une préoccupation majeure de nombreux pays (Belbèze *et al.*, 2023). Comme plusieurs d'entre eux, la France a adopté une politique d'encadrement des sites et sols pollués fondée sur la gestion des risques sanitaires et environnementaux suivant l'usage des milieux. Cependant, elle ne s'appuie pas sur des valeurs guides permettant de statuer sur l'état des sols. En cas de suspicion de pollution, la démarche française privilégie la comparaison de l'état du sol considéré

à celui des sols « sains » voisins de la zone d'investigation. Il s'agit de distinguer le fond géochimique naturel ou anthropisé des sols, et notamment les anomalies géochimiques locales, des contaminations ou des pollutions attribuables aux activités du site (Cary *et al.*, 2008 ; ADEME et Groupe de travail sur les valeurs de fonds, 2018). Certaines initiatives locales ou régionales existent comme la base de données Géomély du Grand Lyon créée en 2017 (Grasset *et al.*, 2011) ou le référentiel pédogéochimique du Nord Pas de Calais (Mossmann, Lafeuille, et Demeyer, 2015). La mise au point d'un référentiel encadré par des méthodes harmonisées et couvrant la totalité du territoire s'est avérée une nécessité.

Les acteurs clés

En 2010 et 2014, l'ADEME et le BRGM ont signé des conventions pour la détermination des teneurs habituellement rencontrées pour les principales substances minérales et organiques présentes dans les sols des parcs et jardins publics des agglomérations françaises (projet Etablissement de fonds pédo-géochimiques urbains, FGU). De 2018 à 2023, le projet FGU s'est poursuivi dans le cadre d'une troisième convention entre l'ADEME, le BRGM, INRAE ainsi que le bureau d'étude eOde (<https://www.eode.ch/>), avec la participation de Mines ParisTech. Il est aujourd'hui porté par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.

Le projet FGU ne porte pas de campagne de prélèvement et d'analyses en propre, mais collecte les données de divers projets. Le projet « Diagnostic des établissements accueillant des enfants et des adolescents – Etablissements sensibles » (2010-2021), conduit par le BRGM, a permis le recueil et la bancarisation des premières données du projet FGU (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2022). Le projet démonstrateur des recommandations du Groupe de Travail « Valeurs de fond » conduit par l'ADEME entre 2014 et 2018 a fait appel aux données déjà bancarisées par le projet FGU et les a complétées (Belbeze *et al.*, 2019).

Les principales étapes et grandes avancées

Le projet « Diagnostic des établissements accueillant des enfants et des adolescents, Etablissements sensibles ou ETS » a concerné, à titre préventif, 1 359 établissements construits sur des sites superposés ou contigus à un ancien site industriel ou une ancienne activité de services répertorié(e) dans la base de données BASIAS (aujourd'hui CASIAS³). Les diagnostics réalisés ont porté sur des prélèvements d'échantillons des sols des établissements et des lieux témoins voisins jugés hors influence d'anciennes activités industrielles. Les échantillons

ont été prélevés en surface, entre 0 et 5 cm de profondeur, car il s'agissait de caractériser les sols des établissements dont les populations sont les plus susceptibles d'ingérer des particules de terre, en particulier en portant les mains à la bouche. Les analyses ont été enregistrées par le BRGM en vue de déterminer des fonds pédogéochimiques anthropisés de surface et venir en appui aux démarches de diagnostics des sols (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2022). Le nombre d'échantillons prélevés est toutefois resté trop faible pour assurer la détermination de valeurs de fond pédogéochimique sur l'ensemble des zones urbaines du territoire. A l'issue de la première convention ADEME-BRGM (2010-2014), seules quelques villes et agglomérations présentaient un échantillonnage supérieur à l'effectif minimal de 30 généralement admis pour permettre une exploitation statistique fiable.

Les terres excavées, longtemps considérées comme des déchets et stockées en décharge une fois franchi le périmètre de leur site d'origine, sont peu à peu entrées dans une logique d'économie circulaire. Leur valorisation, également fondée sur la prise en compte du fond géochimique, est devenue l'objet d'importants enjeux. Cependant, les analyses d'échantillons de surface recueillies dans le cadre du projet ETS ne pouvaient répondre à ce besoin croissant de référentiels profonds (BRGM 2022b).

C'est pourquoi l'ADEME et le BRGM ont signé une deuxième convention (2014-2018) qui a permis de poursuivre la bancarisation des données de l'opération ETS, d'élargir la collecte des données à d'autres projets (aménagement urbains de Toulouse, Nantes), détermination de référentiels régionaux (BRGM 2022c), et de refondre le système de bancarisation en créant la Base de Données des analyses de Sols Urbains (BDSolU).

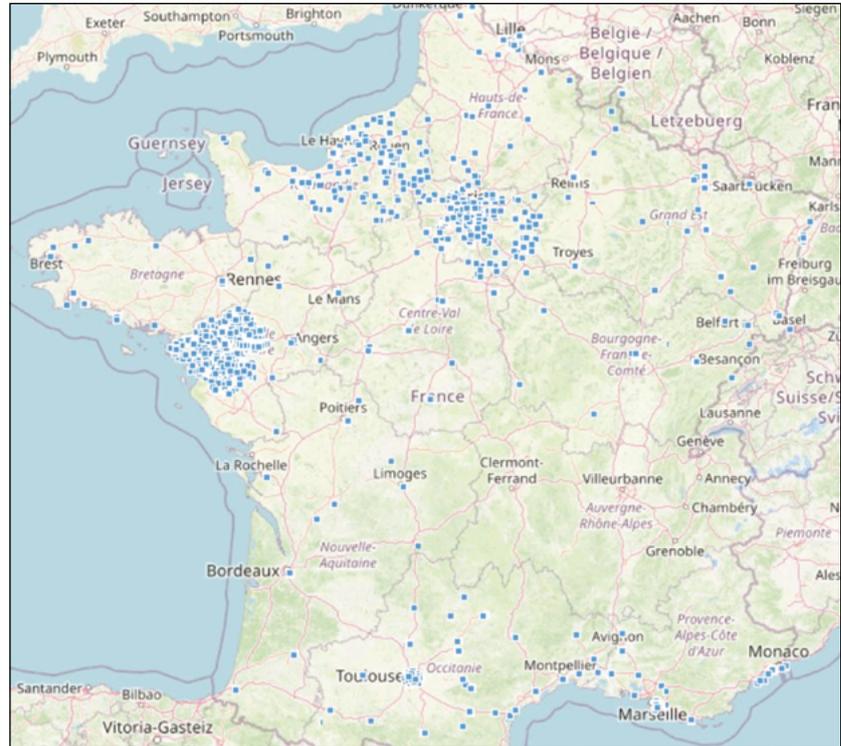
BDSolU permet la bancarisation d'un nombre important de données descriptives des sols, recueillies dans des conditions et selon des protocoles variés. Cette base contient les métadonnées relatives au lieu de prélèvement, au sondage, aux matériaux rencontrés, à l'échantillonnage, à l'échantillon, aux analyses et aux différents intervenants (préleveurs, laboratoires, etc.) (BRGM, 2022b).

En 2018, aux objectifs des précédentes conventions s'ajoutent le développement d'un outil de restitution cartographique interactif des valeurs de fond géochimique et l'étude de la faisabilité de l'interopérabilité des données BDSolU et DoneSol. L'objectif final est de créer un web service où les données seraient déposées, puis interprétées de la manière la plus automatisée possible et restituées aux utilisateurs selon leur représentativité (densité, répartition, panel analytique). En 2021, le BRGM est devenu membre du GIS Sol et la BDSolU l'un de ses programmes. Ces travaux sur l'interopérabilité des données et le développement d'une plateforme commune d'interrogation se poursuivent dans ce cadre.

³ <https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/inventaire-historique-de-sites-industriels-et-activites-de-service> (consulté le 28 août 2024)

Figure 12. BDSoLU : répartition des points de prélèvements en 2024. ©BRGM

Figure 12. BDSoLU: distribution of sampling points in 2024. ©BRGM



Les réussites du programme

Début 2024, la BDSoLU contient plus de 160 000 analyses correspondant à plus de 4 000 échantillons prélevés dans environ 3 000 sondages sur 1 757 sites en France (Figure 12). D'autres données, dont la bancarisation est attendue, devraient plus que doubler le nombre d'analyses bancarisées.

La première version d'une méthode de traitement des données et de détermination des valeurs de fond a été développée de manière concertée entre les partenaires. Elle constitue une avancée pour proposer à l'échelle nationale une méthode fiable, unique et reconnue pour ce calcul qui ne faisait pas encore consensus (Brunet *et al.*, 2023).

En juin 2024, le BRGM a mis à disposition du public (<https://www.bdsolu.fr>), les premières valeurs de fond et statistiques obtenues avec les données de la BDSoLU pour 9 zones urbaines de l'hexagone. Les résultats se présentent sous la forme de tableaux de valeurs statistiques accompagnés des représentations graphiques des populations de résultats d'analyse (histogramme et boîte à moustache) et d'une carte géographique des points de prélèvement dans l'agglomération urbaine étudiée.

L'étude conduite par le BRGM et INRAE au cours de la 3^e convention FGU a montré la faisabilité de l'interopérabilité des données DoneSol et BDSoLU. A terme, cette interopérabilité, construite sur des standards reconnus et des normes internationales (Observations and Measurements, SensorThings

API de l'Open Geospatial Consortium⁴), permettra des croisements avec d'autres bases en France et à l'étranger. Les premiers jalons de possibles collaborations avec les programmes européens LUCAS (LUCAS : Land Use and Coverage Area frame Survey - <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/lucas>) (European Commission, 2021) et EUSO (EUSO : EU Soil Observatory⁵) (Bispo et Le Bas, 2021) ont donc été posés.

Quelques pistes pour l'avenir

La bancarisation de nouvelles données va rester l'objectif principal du programme. Seule une alimentation massive et de qualité de la BDSoLU permettra de couvrir au mieux l'ensemble des zones urbanisées du territoire national. En outre, elle autorisera un traitement des données par la mise en œuvre de méthodes géostatistiques et fiabilisera les valeurs de fond obtenues. L'amélioration de l'algorithme de calcul des valeurs de fond devrait comprendre l'adjonction de modules permettant de mieux prendre en compte les valeurs inférieures aux limites de quantification, de mieux apprécier la représentativité des données sélectionnées, de parfaire la technique de dégroupement spatial. Ces développements accompagneront l'évolution de l'outil de restitution cartographique afin de proposer, à terme, un traitement des données en temps réel et

4 <https://www.ogc.org/fr/publications/standard/sensorthings/>

5 https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eu-soil-observatory-euso_en

l'automatisation de systèmes experts. La poursuite de la mise en place de l'interopérabilité entre les données BDSolU et DoneSol devrait permettre aux utilisateurs d'interroger l'ensemble des deux bases simultanément. Une interface de bancarisation et de consultation des données sur tablette de terrain est en cours de conception pour faciliter le travail des fournisseurs et des utilisateurs des données. BDSolU deviendra progressivement une « plateforme » qui fédèrera des résultats d'analyses de sol issus de sources très diverses (projets d'aménagements de quartiers, démarches de gestion de terres excavées, projets d'élaboration de fonds pédogéochimiques locaux). Elle sera particulièrement utile aux bureaux d'études, aux aménageurs, aux collectivités territoriales, mais aussi au grand public.

Le contexte juridique relatif à la bancarisation des données, à la diffusion du résultat de leur traitement et à l'usage que sont autorisés à en faire les utilisateurs, devra continuer à être précisé et intégré dans les procédures d'acquisition, de traitement et de restitution, comme cela a été fait pour la BDAT et la BDETM.

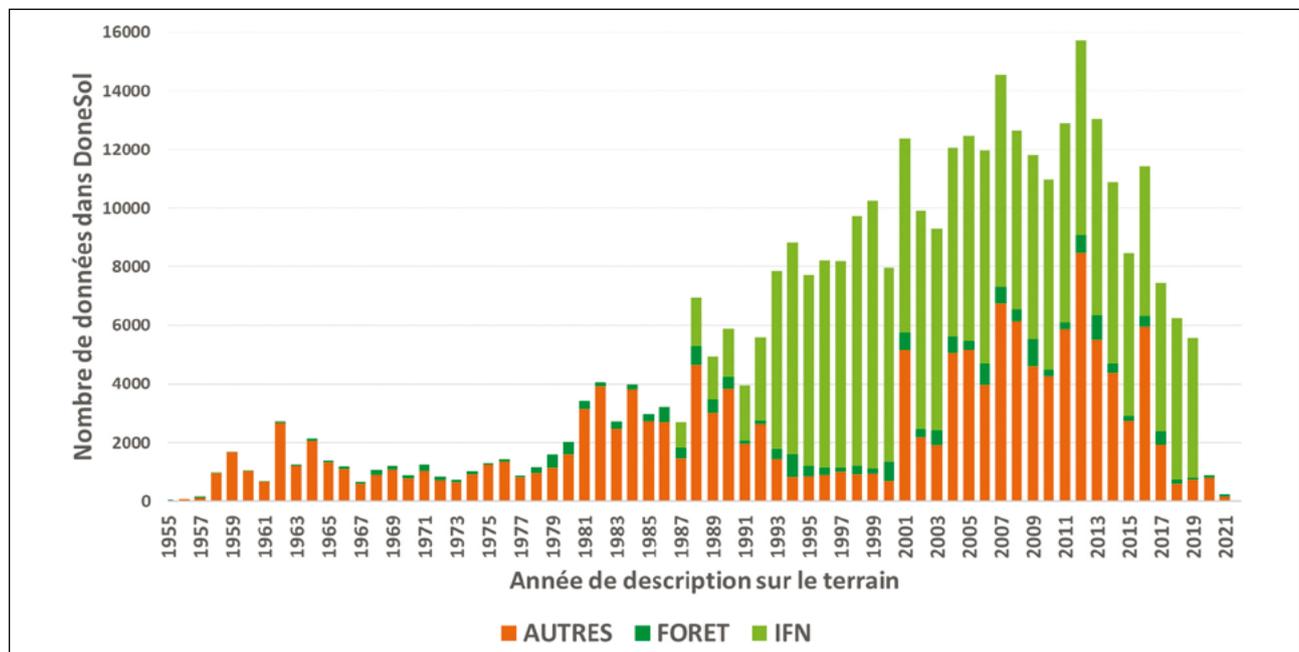
7.LE PROGRAMME IGN SUR LES SOLS FORESTIERS

Le démarrage

Historiquement, les cartographies de sols, coordonnées par le GIS Sol depuis 2000, se sont surtout portées sur les sols agricoles, dans un but de gestion de la production et de protection de l'environnement. La base de données nationale sur les sols, DoneSol, a pendant longtemps sous-représenté les sols forestiers (Party et Granier, 2014) (*Figure 13*), ceux-ci faisant l'objet d'autres bases de données spécifiques : la base ECOPLANT (Gégout, 2000 ; Gégout, 2001 ; Gégout et al., 2005) contient les données pédologiques et les relevés floristiques des catalogues de stations forestières, ainsi que les données des réseaux de suivi forestiers RENECOFOR (Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers) (Ulrich, 1995) et la partie française du programme européen BIOSOIL (Lacarcé et al., 2009). Ce programme BIOSOIL a fait en parallèle l'objet de prélèvements et d'analyses selon la méthode du RMQS ce qui a permis une comparaison des données et une première étude sur la faisabilité à combiner des données acquises avec des méthodes différentes. Cette étude novatrice a permis des comparaisons entre réseaux appliquant des méthodes différentes. Un programme d'inventaire systématique des sols de forêt est par ailleurs mené par le service de l'inventaire

Figure 13. Nombre de données présentes fin 2021 dans DoneSol par année de description sur le terrain et en fonction de l'occupation du sol.

Figure 13. Number of data present at the end of 2021 in DoneSol by year of description in the field and according to land use.



Forestier National (IFN) de l'IGN depuis 1987⁶. Avant 2004, la méthode d'inventaire était basée sur des inventaires forestiers départementaux renouvelés tous les dix à quinze ans. Depuis 2004, la méthode de sondage systématique est appliquée annuellement sur l'ensemble du territoire avec le recueil d'environ 7 000 descriptions floristiques et pédologiques sous forêt (Drapier et Cluzeau, 2001) relevées sur la base d'un sous-échantillon représentatif d'une grille de 1 km de côté. On notera au passage, la convergence entre les changements de stratégies d'échantillonnages spatio-temporelles du RMQS et de l'IFN. D'un échantillonnage temporel mené par blocs géographiques, les deux stratégies ont convergé vers un sous-échantillonnage annuel représentatif de l'ensemble du territoire.

Les acteurs clés

Un premier groupe de travail a été constitué en 2018-2019 pour améliorer l'intégration de descriptions de sols forestiers dans DoneSol, coordonné par INRAE Info&Sol et réunissant des agents du CRPF (Centre Régional Propriété Forestière), de l'ONF (Office National des Forêts), d'AgroParisTech et de diverses unités INRAE. Les réflexions de ce groupe sur une meilleure prise en compte des spécificités des sols forestiers au sein de DoneSol ont facilité l'intégration en 2021 des données de l'IFN dans DoneSol, menée en collaboration étroite entre INRAE Info&Sol et l'IGN.

Les principales étapes, grandes avancées et état des lieux

Des efforts de fédération des producteurs de données sur les sols forestiers ont abouti à des modifications et à un enrichissement très notable de DoneSol avec l'ajout de nouvelles variables (e.g., indice de niveau hydrique bio-indiqué par la flore, indice de niveau trophique bio-indiqué calculé à partir du relevé floristique) et nouvelles catégories pour des variables codées existantes (e.g., classes de texture du sol selon le triangle de texture de l'IFN, méthode d'utilisation de la flore pour estimer le pH_{eau} sur le terrain), (Figure 13). Ces données ne contiennent pas de résultats d'analyses mais sont très riches en variables descriptives des sols forestiers (e.g., présence d'éléments grossiers, type d'humus, texture au toucher, hydromorphie, profondeur). Ce projet se poursuit avec l'intégration annuelle des nouvelles données IFN. Les données des années 2020-2021 devraient être prochainement intégrées.

Les réussites du programme

L'amélioration de DoneSol profite à tous avec notamment un gros travail de généralisation d'une intégration de données en blocs. Dans le cas des données IFN, cette intégration a été construite afin d'être appliquée en routine chaque année. Il est désormais important d'analyser l'enrichissement en connaissances qu'elle apporte et de voir également comment le protocole de terrain pourrait être amélioré. Une première harmonisation des données forestières issues de différents programmes indépendants d'acquisition, focalisée sur la texture et le nom du sol, a été effectuée avec succès sur le département du Loiret (Eymard *et al.*, 2024, 2023).

Quelques pistes pour l'avenir

L'étude de la complémentarité entre les données IFN et les données des autres programmes d'acquisition des données sol (Eymard *et al.*, 2023) propose quelques améliorations du protocole de terrain de l'IFN afin de réduire les incertitudes. Parmi les propositions, la réalisation de quelques analyses granulométriques permettrait de créer une « texturothèque » à disposition des agents IFN pour une meilleure reconnaissance des textures sur le terrain. Cela permettrait aussi d'améliorer la correspondance entre le triangle de texture de l'IFN et celui de l'Aisne ou du GEPPA couramment utilisés en France. De plus, des propositions d'acquisition de nouvelles propriétés de sols (ex : carbone, tassement) ont été émises, comme la mesure de pH, du carbone, l'observation de la présence de tassements ou la description des horizons podzoliques profonds. Ces propositions seront discutées avec l'ensemble des acteurs de terrain afin d'analyser leur faisabilité. Une autre voie est d'explorer l'interopérabilité de DoneSol avec les bases de données existantes afin de conserver le lien entre les paramètres du sol et la description floristique.

Le succès de l'intégration des données IFN dans DoneSol, pourrait être le début d'une fédération de l'ensemble des données des pédologues forestiers autour de DoneSol. Cette base nationale, en devenant une référence pour les pédologues forestiers, pourrait être, soit utilisée systématiquement pour la sauvegarde des données pédologiques forestières françaises, soit pour des utilisations spécifiques par des outils ou des applications (e.g. l'application mobile « For-Eva I » permettant d'évaluer la sensibilité des sols forestiers français au prélèvement de menu bois, à l'érosion ou encore au tassement). L'harmonisation de format dans DoneSol mettrait ainsi ces outils à disposition de tous. Enfin, cette intégration devrait permettre de mieux analyser les conséquences des changements d'usages des sols, entre forêts et usages agricoles.

6 <https://inventaire-forestier.ign.fr/>

8. CAPITALISER, TRAITER ET DIFFUSER LES ÉCHANTILLONS, LES DONNÉES ET LES INFORMATIONS COLLECTÉES

Au-delà de l'animation et de l'exécution des six programmes décrits ci-dessus, les missions du GIS Sol sont de prendre en charge, sur le long terme, la capitalisation et la conservation des données et des échantillons de sol, ainsi que le traitement des données en vue de produire des informations et des statistiques nationales pour le soutien des politiques publiques, la santé globale des citoyens et des écosystèmes (en référence au concept « Une seule santé » (one health)).

La capitalisation des données, le développement d'un SI

Une base de données appelée DoneSol a été constituée dès 1992 permettant de stocker, de manière unique et harmonisée, l'ensemble des études pédologiques réalisées dans le cadre du programme IGCS (Gaultier *et al.*, 1993). Les données du programme RMQS y ont été intégrées en 2002 (Grolleau *et al.*, 2004). Différentes versions (Toutain, 2013) ont permis de faire évoluer le modèle de données afin d'intégrer de nouveaux types de données, d'affiner leur description, d'améliorer l'efficacité de la base de données et son évolutivité. A cette base s'ajoutent différents outils ou applications de saisie des données depuis internet (DoneSolWeb dont la dernière version DoneSolWeb 4 a été lancée en mai 2023), la vérification de leur qualité (Sivercoh) et bientôt la saisie directe sur le terrain (DoneSolNomade) (Le Bas *et al.*, 2024). En plus des données sols de l'Inventaire Forestier National récemment transférées, un travail est en cours pour y transférer certaines données des territoires ultramarins actuellement gérées dans la base de données ValSol de l'IRD (Brossard *et al.*, 2023).

A la base de données DoneSol, s'ajoutent les bases de données BDAT et BDETM où chaque analyse de sol est géoréférencée à la commune pour répondre à la protection juridique des données personnelles. L'ensemble de ces bases de données est géré dans un système d'information. Pour faciliter l'interrogation des données et disposer de jeux de données validés, faciles à mettre à jour et à diffuser, un système d'information décisionnel (SID) et un système d'information statistique (SIS) ont été développés. Le SID met en œuvre un ensemble de techniques et d'outils pour faciliter l'accès, l'interrogation et l'analyse des données en provenance des bases de données du système d'information opérationnel (DoneSol, les bases de données BDAT et BDETM) mais aussi pour faciliter leur croisement avec d'autres sources de données (climatiques, topographiques, d'occupation du sol, etc.). L'expertise acquise sur les données et les traitements est ainsi capitalisée pour toutes les bases en automatisant les outils mis au point par les ingénieurs chargés de l'analyse des

données. Le système d'information statistique (SIS) organise et automatise les traitements statistiques réalisés dans le système d'information décisionnel, en produisant des tableaux de données et des cartes. L'ensemble de ces données est ensuite diffusable à travers des services web⁷.

La capitalisation des échantillons de sol

Le Conservatoire européen des échantillons de sols (CEES) est une infrastructure collective du GIS Sol dont l'objectif est la conservation à long terme d'échantillons de sol suivant des conditions de température et d'hygrométrie contrôlées. Il a été mis en place en 2003, et s'est concrétisé par la construction d'un bâtiment dédié en 2013. S'il archive prioritairement des échantillons de sol prélevés dans le cadre du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), il conserve des sols issus d'autres dispositifs tels que le projet européen ICOS ainsi que des échantillons historiques issus du programme IGCS ou de suivis de longue durée (Ratié *et al.*, 2010).

Le Conservatoire comprend actuellement près de 78 000 échantillons pour un peu plus de 90 T de terre. Il est impliqué dans toute la chaîne : prélèvement, préparation, conservation sur le long terme, puis remobilisation éventuelle pour des programmes de recherche d'intérêt national. Il assure une partie de leur caractérisation ainsi que l'interface avec les différents laboratoires d'analyse. Des procédures qualité, écrites en fonction des programmes, encadrent ses activités et suivent l'amélioration continue du système Qualité INRAE. Cette collection d'échantillons de sol fait partie de l'infrastructure nationale de recherche RARE, inscrite sur la feuille de route nationale qui regroupe cinq réseaux de Centres de Ressources Biologiques (CRB) conservant diverses ressources génétiques, génomiques et biologiques d'intérêt.

Cette conservation des échantillons est nécessaire pour réaliser a posteriori des analyses, et ainsi remonter le temps pour détecter des évolutions passées pour certains paramètres correspondant à des problématiques nouvelles, ou pour des paramètres pour lesquels des analyses nouvelles se développent, ou tout simplement de différer dans le temps des analyses pour lesquelles aucun budget n'est disponible au moment du prélèvement des échantillons. Il est possible d'évaluer d'éventuelles dérives analytiques dans le temps, et ainsi de distinguer ce qui relève réellement d'évolutions temporelles des propriétés des sols. Enfin, la banque d'échantillons permet d'accéder à l'ensemble des échantillons géoréférencés et représentatifs de la variété des sols français et de leurs occupations. Le CEES est donc une « mémoire des sols » qui n'est en aucun cas possible à reconstruire, et qui lui confère un caractère patrimonial indéniable.

⁷ <https://www.gissol.fr/donnees/webservices>

L'accès aux échantillons patrimoniaux du RMQS est régi par une charte et est soumis à l'avis des instances de gouvernance du GIS Sol.

Le développement des méthodes de traitement des données

Comme cela a déjà été précisé, en disposant dans le même système d'information d'observations sur les propriétés des sols et de variables représentant certains de leurs déterminants, il est possible, en utilisant des modèles adaptés, de décrire spatialement et temporellement la distribution des sols et de leurs propriétés. Il est également possible de calculer des indicateurs liés par exemple aux services rendus par les sols comme le potentiel de stockage (Chen *et al.*, 2019 ; Martin *et al.*, 2021) ou de simuler des dégradations (Coblinski *et al.*, 2023). Ces méthodes fournissent les incertitudes associées aux estimations pour mieux informer l'utilisateur de la précision des estimations (Chen *et al.*, 2024), d'identifier des zones prioritaires pour acquérir de nouvelles données. Ces estimations pouvant elles-mêmes être intégrées dans différents modèles, il est important d'évaluer la propagation des incertitudes liées aux données sur les sols sur les sorties finales des modélisations. Afin de répondre à la demande sociétale et des pouvoirs publics, la production d'indicateurs, de statistiques ou encore de bilans est souvent réalisée, sur des propriétés très différentes des sols qui peuvent être la quantité d'ADN microbien, le réservoir utile, le stock de carbone, les contaminants ou encore l'état minéral.

La diffusion des données

Pour faciliter l'accès aux données, le GIS Sol s'est doté d'un site internet (www.gissol.fr) conçu comme le portail des données sur les sols de France. Il met ainsi à disposition des restitutions statistiques et cartographiques et propose divers outils de recherche d'informations sur les sols (Le Bas *et al.*, 2024).

Différents outils de consultation ont été développés pour aider l'utilisateur dans sa recherche d'études pédologiques existantes (Refersols, <https://webapps.gissol.fr/georefersols/>), d'organismes intervenant en pédologie (Répédo, <https://annuaire.gissol.fr/repedo>) ou d'applications thématiques réalisées à partir des bases de données cartographiques sur les sols (Applicasol, (Giroit *et al.*, 2017), <https://annuaire.gissol.fr/applicasol>)

Une synthèse de la couverture nationale au 1/250 000ème des sols, réalisée en lien avec le RMT Sols et Territoires, est visualisable sur le site du Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>).

L'application web Geosol (<https://webapps.gissol.fr/geosol/>) permet d'afficher des cartes à l'échelle nationale, des statistiques, calculées pour différentes entités administratives, sur les données de la BDAT. L'application s'appuie sur le système d'information décisionnel ; les données agrégées sont

calculées par le système d'information statistique de manière semi-automatique.

La diffusion de données spatiales s'appuie sur l'infrastructure de données spatiales d'INRAE, compatible avec les exigences de la Directive européenne Inspire. Les jeux de données cartographiques sont diffusés en services web cartographiques, avec des métadonnées au format Inspire, utilisables dans des Systèmes d'Information Géographique. Le portail peut-être également moissonné par le Géocatalogue, site institutionnel national. En complément, des jeux de données sont également disponibles sur le portail des données ouvertes de la recherche française où un DOI peut leur être attribué. La diffusion des données sur les différents sites est réalisée de manière complémentaire et optimisée.

De nouvelles technologies sont désormais disponibles pour permettre une diffusion des données plus interopérables. Elles sont actuellement explorées, en se focalisant dans deux directions peu éloignées l'une de l'autre : l'utilisation de l'API SensorThings basé sur la norme OGC Observation and Measurement, et le web sémantique qui permet de s'inscrire dans les technologies de l'internet des objets. L'intérêt de ces technologies est de décrire explicitement les métadonnées avec les données elles-mêmes, de manière standardisée et compréhensible par les machines. Seules ces technologies sont à même de diffuser des données interopérables.

9. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Avec plus de 20 ans d'existence, le GIS Sol a pu développer un système national d'information sur les sols agricoles, forestiers, naturels, et urbains qui repose sur six programmes, animés par les membres du GIS Sol, en lien avec différents partenaires locaux. Cette structuration nationale, orchestrée par la puissance publique et animée par la recherche a montré son efficacité et son adaptabilité : la France dispose d'un inventaire quasi exhaustif de ses sols, d'un réseau de surveillance et de différentes bases de données, riches et originales, sur l'état des sols (Arrouays *et al.*, 2022). Le GIS Sol a ainsi piloté l'acquisition, la capitalisation, l'exploitation et la diffusion des informations sur les sols : ce modèle de gouvernance, assez rare en Europe, est souvent cité en exemple (Arrouays *et al.*, 2023 ; Gascuel-Oudou *et al.*, 2023).

Depuis une décennie, on assiste à un paradoxe sur la connaissance des sols. L'enjeu de la protection et de bonne gestion des sols pénètre de plus en plus la société, intègre les politiques publiques, est relayé au plan médiatique (e.g., initiative 4 pour mille, sécurité alimentaire, climat, plan biodiversité, définition des zones défavorisées simples, plans locaux d'urbanisme, économie circulaire, gestion forestière). Les besoins associés en données sol sont forts et croissants. Ceci est d'autant plus prégnant que de nouveaux enjeux autour de la contamination (microplastiques, pesticides, PFAS...) ou la

biodiversité des sols montent en puissance et vont nécessiter de nouveaux programmes d'acquisition dédiés, pour connaître l'état des sols, pour suivre l'efficacité des politiques publiques agricoles et forestières, climatiques, sanitaires ou environnementales. De nombreuses politiques nationales, régionales et locales vont nécessiter des informations plus précises sur les sols en France Hexagonale et Ultra-marine, pour l'aménagement du territoire, le développement de l'agroécologie, la gestion forestière, la délimitation des zones humides, le stockage de carbone dans les sols ou encore l'exposition des populations aux contaminants.... A l'heure où les programmes du GIS Sol ont pleinement fait la preuve de leur utilité, il est désormais nécessaire de changer de braquet, d'accélérer l'acquisition et la production de données nouvelles et informations sur les sols, en France hexagonale et ultra-marine, pour renforcer ce système national (Renault *et al.*, 2023). Dans le même temps, les moyens d'intervention publique pour la cartographie et la surveillance des sols restent globalement constants, ou en légère augmentation, en raison de contraintes économiques. Ce paradoxe interroge le GIS Sol : comment poursuivre et accroître la connaissance des sols en France, garantir leur prise en compte dans les diverses politiques et ainsi mieux les protéger ? Plusieurs perspectives se dégagent (Gascuel-Oudou *et al.*, 2023) : mieux faire connaître les données, leurs utilisations et applications, encourager et encadrer les études et caractérisations des sols à diverses échelles et par divers acteurs (publics, privés et citoyens), simplifier la capitalisation et la réutilisation des données acquises. Si le GIS Sol et ses données sont assez bien connus des acteurs nationaux impliqués dans la connaissance des sols et plus largement de l'agriculture et de l'environnement, force est de constater qu'aux échelles régionales ou locales ou encore pour des communautés telles que celle de la santé, du climat ou encore de l'aménagement du territoire, la diffusion et l'explication des données « sol » doivent encore progresser. Ces données sont encore insuffisamment connues, apparaissent encore complexes à appréhender. Ce manque de visibilité subsiste malgré leur affichage sur le géoportail national et leur accès via des dataverses ou des serveurs de données géographiques. Peu connues, donc peu utilisées et le besoin d'en collecter de nouvelles peu présent en dehors des acteurs du sol, alors même qu'il s'agirait d'encourager et de généraliser les études et caractérisations des sols, par divers acteurs, publics et privés, agricoles, forestiers, de l'aménagement du territoire, de la protection de l'environnement... Ces acteurs, connaissent peu les sols, les modes opératoires et les opérateurs qualifiés et il faut préalablement développer et publiciser des guides ou des cahiers des charges permettant de diffuser des modes d'acquisition standardisés (méthodes de prélèvement et d'analyse...) et expliquer tout l'intérêt de capitaliser et partager au sein d'un système national les données collectées (saisie et archivage dans DoneSol, BDSolU...). Cela garantirait non seulement la qualité des données collectées, leur traçabilité et

leur capitalisation mais également leur accès et réemploi.

Les acteurs privés et publics doivent mieux agir en synergie pour utiliser le système national mis en place depuis plus de 20 ans par le GIS Sol, évitant à chacun de redéfinir des formats, de redévelopper des bases de données... et permettant à tous de partager la richesse des informations disponibles sur un territoire donné, d'éviter de refaire des caractérisations sur des zones déjà connues et renseignées par un autre opérateur. Le développement des sciences participatives et leur intégration au système national (Ranjard *et al.*, 2022) permettra non seulement d'enrichir le système national d'information mais également de sensibiliser et faire connaître les sols. La charge de l'acquisition et de la gestion des données et informations sur les sols serait alors partagée sur un ensemble d'acteurs publics, privés et citoyens. Si collectivement nous devons contribuer à la connaissance et à la préservation des sols, la puissance publique doit poursuivre et amplifier son investissement qui, comparé à ceux consentis pour d'autres milieux comme l'eau ou l'air, reste modeste, alors même que les sols sont au cœur des défis mondiaux que sont l'alimentation et la santé des populations, l'atténuation et l'adaptation des territoires au changement climatique, le développement de la bioéconomie, la gestion des ressources en eau ou encore la préservation de la biodiversité et l'aménagement. Ce manque d'investissement est, pour partie, lié à l'absence de mesure de protection : gageons que l'adoption de la directive récemment proposée relative à la surveillance et à la résilience des sols permettra au GIS Sol et à ces différents programmes actuels et futurs de changer de dimension.

10. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME et Groupe de travail sur les valeurs de fonds (2018). Guide pour la détermination des valeurs de fonds dans les sols - échelles d'un territoire / d'un site. Sols pollués - Expertises. ADEME. <https://bibliothec.ademe.fr/sols-pollues/32-guide-pour-la-determination-des-valeurs-de-fonds-dans-les-sols-echelles-d-un-territoire-d-un-site.html>
- Antoni V., Arrouays D., Bispo A., Brossard M., Le Bas C., Stengel P., Villanneau E., Baize D., Barriuso E., Blanca Y. (2011). Rapport sur l'état des sols de France. 192 p. <https://www.gissol.fr/publications/rapport-sur-letat-des-sols-de-france-2-849>
- Antoni V., Saby N.P.A., Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Ratié C., Bispo A., Eglin T., Pierart A., Gay A., Perrin J.-L., Joassard I. (2019). Arsenic et mercure dans les sols français : pollutions diffuses et ponctuelles. 4. rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués. Montrouge, France. <https://hal.inrae.fr/hal-03267277>
- Arrouays D. (1989). Commentaires méthodologiques sur l'élaboration de cartes des paysages pédologiques à 1/250 000. Exemple du Loiret. Science du sol, 27 (1) : 13-16.
- 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., Soussana J.-F. (2023). Le rayonnement et les actions significatives du GIS Sol à l'international. Etude et Gestion des Sols, 30, 83-96.

- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Ratié C., Saby N.P.A., Grolleau E. (2003). Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) de France. *Étude et Gestion des Sols*, 10 (4) : 241-252.
- Arrouays D., Lagacherie P., Hartemink A.E. (2017). Digital Soil Mapping across the Globe. *Geoderma Regional, Digital soil mapping across the globe*, 9 (juin) : 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.03.002>
- 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-Oudou C., (2022). Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années. *Étude et Gestion des Sols*, 29, 365-379.
- 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. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/6472391953aa8c896302c868>
- Arrouays D., Thorette J., Feix I., Lesaffre B., Stengel P. (2021). La naissance du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 28, 49-56.
- 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*, 13 (3) : 181-200.
- Belbèze S., Djemil M., Béranger S., Stochetti A. (SCM), (2019). Détermination de FPGA - Fonds Pédologique-Géochimiques Anthropisés urbains. Agglomération pilote : TOULOUSE METROPOLE. Rapport final. BRGM/RP-69502-FR, 347 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-69502-FR.pdf>
- Belbèze, S., Rohmer, J., Négrel, P., & Guyonnet, D. (2023). Defining urban soil geochemical backgrounds: A review for application to the French context. *Journal of Geochemical Exploration*, 107298.
- Belon, E., Boisson, M., Deportes, I. Z., Eglin, T. K., Feix, I., Bispo, A. O., Galsomies L., Leblond S., Guellier, C. R. (2012). An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 439, 87-95.
- Bispo A., Arrouays D., Saby N., Boulonne L., Fantappiè M. (2021a). Proposal of methodological development for the LUCAS programme in accordance with national monitoring programmes. Deliverable. 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., Siebelec G., Jones A. (2022). A review of existing soil monitoring systems to pave the way for the EU Soil Observatory. 22. world congress of soil science, British Society of Soil Science, Jul 2022, Glasgow, United Kingdom. pp.1-15.
- Bispo A., Guellier C., Martin E., Sapjanskas J., Soubelet H., Chenu C. (2016). Les sols : intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable. *Savoir Faire*. Editions Quae. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01531711>
- Bispo A., Imbert C., Jolivet C., Lévêque A., Bougon N. (2021b). Soil biodiversity monitoring in France. EUSO Stakeholders Forum. Conférence virtuelle, Italy: Joint Research Centre. <https://hal.inrae.fr/hal-03766991>
- Bispo A., Sauter J., Soucémariadin L., Marraccini E., Lemerrier B., Laroche B., Fort J.-L., Ducommun C., Pousse N., Lucot E., Lagacherie P., Ubertosi M. (2021c). RMT Sols & Territoires: A French Network of Institutions Focused on the Collection and Use of Soil Data for Local Policies. Eurosoil 2021, Genève, Suisse.
- Bispo A. et Laroche B. (2022). Session 1 : Vers l'intégration de la multifonctionnalité des sols dans la planification et l'aménagement du territoire : Quelles sont les données « sol » disponibles ? Journée Technique ADEME Transfert des résultats de la recherche en outils opérationnels. Thématique : multifonctionnalité des sols, ADEME, Sep 2022, Paris, France.
- Bispo A. et Le Bas C. (2021). Is there a role of EU national soil data organizations in contributing to EUSO? The French example – EU Soil Observatory, Stakeholder Forum – Data integration session – November 20th, 2021. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/u891/EUSO/first-SHF/presentations/data/5_antonio_bispo_euso_session_dataintegration_france.pdf
- Bornand M., Legros J.-P., Rouzet C. (1994). Les banques régionales de données-sols. Exemple du Languedoc-Roussillon. *Étude et Gestion des Sols*, 1 (1) : 67-82.
- Bourgeois A., Allard D., Saby N., Martin M., Arrouays D. (2012). Optimisation d'un échantillonnage annualisé d'un réseau national de surveillance de la qualité des sols : Application aux teneurs en carbone du RMQS. Rapport de contrat GIS Sol, 52 p.
- Bouvais, A., Boulonne, L., Lee, A., Munier-Jolain, N., Chéry, P., Langlois, V., Jolivet, C. (2022). Collecte des données de pratiques agricoles des sites du Réseau de mesures de la qualité des sols - Méthodologie pour l'évaluation des formulaires d'enquête, amélioration de la stratégie de collecte et nouvelle piste pour l'archivage des données. *Étude et Gestion des Sols, Numéro spécial 20 ans du RMQS*, 29, 31-50.
- BRGM (2022a). Site internet BDSolU.fr <http://www.bdsolu.fr/>
- BRGM (2022b). Site internet Terres Excavées InfoTerre <https://tex-infoterre.brgm.fr/fr>
- BRGM (2022c). GeoBaPa : un référentiel pour une meilleure gestion des terres issues du BTP | BRGM. <https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/geobapa-referentiel-meilleure-gestion-terres-issues-btp>
- Brossard, M., Fujisaki, K., Jolivet, C., Dupuits-Bonin, E., Jameux, M., Jalabert, S., Toulemonde Le Ny E., Becquer T., Blavet D., Beaudou A., Boulonne L., Desjardins T., Martret H., Ratié, C. (2023). Le GIS Sol dans les départements et régions d'Outre-mer français. *Étude et Gestion des Sols, Numéro spécial 20 ans du RMQS*, 30, 145-168
- Brunet J. F., Branchu P., Eyche C., Belbèze S., Guyonnet G. (2023). L'offre du GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain. Numéro spécial « 20 ans du GIS Sol », 30, 195-206
- Carne G., Leconte S., Sirot V., Breyse N., Badot P.-M., Bispo A., Deportes I.Z., Dumat C., Rivière G., Crepet A. (2021). Mass balance approach to assess the impact of cadmium decrease in mineral phosphate fertilizers on health risk: The case-study of French agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 760: 143374.
- Cary L., Maton D., Piantone P. (2008). Géochimie des sols, bases de données : inventaire, proposition de démarches pour évaluer la qualité des données et estimer les fonds géochimiques. Rapport final. BRGM/RP-57133-FR. 188 p., <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57133-FR.pdf>
- Chapuis J. F., Toutain B., Le Bas C., Laroche B. (2012). Sivercoh : Système d'Information de VÉRification de la COHérence des bases de données relationnelles. (logiciel)
- Chen, Q., Richer-De-Forges A., Chen S., Vaudour E., Bispo A., Arrouays D. (2024). Uncertainty in Digital Soil Mapping at Broad-Scale: A Review. EGU General Assembly 2024. 14 avril 2024. <https://hal.inrae.fr/hal-04553210>
- Chen S., Arrouays D., Angers D.A., Chenu C., Barré P., Martin M.P., Saby N.P.A., Walter C. (2019). National Estimation of Soil Organic Carbon Storage Potential for Arable Soils: A Data-Driven Approach Coupled with Carbon-Landscape Zones. *Science of The Total Environment* 666 (mai): 355-67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.249>
- Chen S, Martin M, Saby N, Walter C, Angers D, Arrouays D. (2018). Fine resolution map of top- and subsoil carbon sequestration potential in France. *Science of the total environment*, 630, 389-400.
- Chen, S., Richer-de-Forges, A.C., Mulder, V.-L., Martelet, G., Loiseau, T., Lehmann, S., Arrouays, D. (2021). Digital mapping of the soil thickness of loess deposits over a calcareous bedrock in central France. *CATENA*, 198, March 2021, 105062. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105062>
- Cîteau L., Bispo A., Bardy M., King D. (2008). Gestion durable des sols. Editions Quae, 336 p.
- Coblinski, J.A., Reyes-Rojas J., Pindral S., Anton-Sobejano R., Cousin I., Borůvka L., Piccini C., Saby N.P.A., Cornu S. (2023). How to Use Soil

- Threats Bundles to Assess the Effects of Climate Change and Land Use Changes at EU Scale. In *Wageningen Soil Conference – Working Together on Solutions for a Sustainable World*. Wageningen, Netherlands. <https://hal.inrae.fr/hal-04220465>
- Dequiedt S., Karimi B., Chemidlin Prévost-Bouré N., Terrat S., Horrigue W., Djemiel C., Lelievre M., Nowak V., Wincker P., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Feix I., Eglin T., Lemanceau P., Maron P.A. et Ranjard L. (2020). Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français. *Étude et Gestion des Sols*, Numéro spécial 20 ans du RMQS, 27, 51-71.
- Dequiedt S., Saby N. P. A., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., Ranjard L. (2011). Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management. *Global Ecology and Biogeography* 20 (4): 641-52.
- Deslais W., Baize D. (1997). Etude des éléments traces dans les sols agricoles français. Un programme ADEME / INRA. Journées techniques 1997 : Epandage des boues résiduaires. Aspects sanitaires et environnementaux. Extraits des principales interventions. <https://hal.inrae.fr/hal-02765594>
- Directorate-General for Environment (2023). Proposal for a Directive on Soil Monitoring and Resilience. https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-directive-soil-monitoring-and-resilience_en
- Djemiel, C., Terrat S., Dequiedt S., Jolivet C., Maron P.-A., Ranjard L. (2024). Atlas Français des champignons du sol. Biotope. 350 p. <https://hal.inrae.fr/hal-04654532>
- Drapier J., Cluzeau C. (2001). La base de données écologiques de l'IFN. Une approche factorielle et synthétique des écosystèmes forestiers. Les 40 ans de l'IFN - Utilisation et valorisation des données collectées. *Revue forestière française*, LIII(3-4), 391-396
- Duigou N., Baize D. (2012). Teneurs en ETM de l'horizon de surface des sols en France - Constitution et possibilités d'utilisation de la BDEtm. 11. Journées d'Etude des Sols (JES), Versailles. <https://hal.inrae.fr/hal-02749768>
- 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*, 18 (2): 91-108.
- Duparque, A., Godard A., Scheurer O., van Dijk P., Vandewalle F., Martin P., Sagot S., Fort J.-L., Mata L., Guichard L., Mary B., Piskiewicz N., Rosenfelder C., Saby N., Vigot M., Eglin T. (2016). Atténuation du Bilan de gaz à effet de serre et stockage de carbone organique dans les sols agricoles à l'échelle d'un territoire. Rapport, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Énergie. <https://hal.science/hal-01608838>
- European Commission (2023). EU Mission: A Soil Deal for Europe. 19 juillet 2023. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/soil-deal-europe_en
- European Commission (2006). Commission staff working document - Document accompanying the Communication from the Commission to the Council, The European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - Thematic Strategy for Soil Protection - Impact assessment of the thematic strategy on soil protection {COM(2006)231 final}{SEC(2006)1165}. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:52006SC0620>
- European Commission (2021). Eurostat, LUCAS : enquête sur l'utilisation et l'occupation des sols : édition 2021, Publications Office, 2021. <https://data.europa.eu/doi/10.2785/8785>
- Eymard, A., Richer-De-Forges A.C., Commagnac L., Martelet G., Bialkowski A., Tissoux H., Arrouays D. (2023). Using Soil Information from Different Sources: A Pilot Study on Hand-Feel Textures of Forest Soils in a French Department. In: *Soil Mapping for a Sustainable Future*. 2nd Joint Workshop of the IUSS Working Groups Digital Soil Mapping and Global Soil Map. Best Poster. Orléans, France. <https://hal.inrae.fr/hal-03982494>
- Eymard, A., Richer-de-Forges A.C., Martelet G., Tissoux H., Bialkowski A., Dalmasso M., Chrétien F., Belletier D., Ledemé G., Laloua D., Josière O., Commagnac L., Bourennane H., Arrouays D. (2024). Exploring the Untapped Potential of Hand-Feel Soil Texture Data for Enhancing Digital Soil Mapping: Revealing Hidden Spatial Patterns from Field Observations. *Geoderma*, 441 (janvier):116769. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116769>
- FAO, ITPS, GSBI, SCBD, and EC (2020). State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
- Favrot, J.-C., Lagacherie P. (1989). La valorisation de l'information pédologique : l'exemple des secteurs de référence drainage. *Science du Sol*, 27 (1): 109-12.
- Follain S., Schwartz C., Denoroy P., Villette C., Saby N.P.A., Arrouays D., Lemercier B., Walter C. (2009). A Method for Assessing Available Phosphorus Content in Arable Topsoils over Large Spatial Scales. *Agronomy for Sustainable Development*, 29 (2): 371-79. <https://doi.org/10.1051/agro:2008046>
- Froger, C., Jolivet, C., Budzinski, H., Pierdet, M., Caria, G., Saby, N. P., Arrouays D., Bispo, A. (2023a). Pesticide Residues in French Soils: Occurrence, Risks, and Persistence. *Environmental Science & Technology*.
- Froger, C., Pelfrène A., Volatier J.L., Roussel H., Marot F., Brunet J.-F., Saby N.P.A., Bispo A. (2023b). L'offre du GIS Sol en appui aux questions de santé: les données disponibles et leur utilisation pour les politiques publiques et la recherche. *Étude et Gestion des Sols*, 30 (spécial virtuel « 20 ans du GIS Sol »): 235-52.
- Froger C., Saby N., Jolivet C.C., Boulonne L., Caria G., Freulon X., de Fouquet C., Roussel H., Marot F., Bispo A. (2021). Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. *Soil*, 7 (1): 161-78.
- Froger, C., Tondini E., Arrouays D., Oorts K., Poeplau C., Wetterlind J., Putku E., Saby N.P.A., Fantappiè M., Styc Q., Chenu C., Salomez J., Callewaert S., Vanwinddekens F.M., Huyghebaert B., Herinckx J., Heilek S., Harbo L. S., De Carvalho Gomes L., Lázaro-López A., Bispo A. (2024). Comparing LUCAS Soil and National Systems: Towards a Harmonized European Soil Monitoring Network. *Geoderma* 449 (septembre):117027. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117027>
- Gascuel-Oudou, C., Renault P., Antoni V., Arrouays D., Bougon N., Denys S., Fiquet J., François Y., Ilef A., Joassard I., Kaszynski M., Laville P., Le Bas C., Vaudour E., A. Bispo A. (2023). Quelles perspectives scientifiques et techniques pour l'inventaire et la surveillance des sols en France : Quels besoins en données, comment mieux les acquérir, les diffuser, les utiliser ? *Étude et Gestion des Sols*.
- 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.
- Gégout, J.C. (2000). Création d'une base de données phytoécologiques pour déterminer l'autécologie des espèces de la flore forestière de France. In : *Les 40 ans de l'Inventaire Forestier National: utilisation et valorisation des données collectées*. Nancy, France.
- Gégout J.C. (2001). Création d'une base de données phytoécologiques pour déterminer l'autécologie des espèces de la flore forestière de France. *Revue Forestière Française*, 3-4, pp. 397-403.
- Gégout J.C., Coudun C., Bailly G., Jabiol B. (2005). Ecoplant: A forest site database linking floristic data with soil and climate variables. *Journal of Vegetation Science*, 16, pp. 257-260. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02363.x>
- Girrot, G., Millet F., Schnebelen N., Cousin I., Toutain B., Bardy M. (2017). Applicasol, un outil de partage des applications thématiques sur les sols. *Étude et Gestion des Sols*, 24 (1) : 33-43.
- Grasset, M., Clozel B., Clottes P., Correa J. (2011). Mise en place d'une base de données sur le bruit de fond géochimique sur le territoire communautaire du Grand Lyon. In : *Intersol 2011*. Lyon, France. <https://brgm.hal.science/hal-00607273>

- Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin J.-C., Fort J.-L., Falipou P., Arrouays D. (2004). Le système d'information national sur les sols : DONESOL et les outils associés. *Etude et Gestion des Sols*, 11 (3) 255-270.
- Horrigue W., Dequiedt S., Chemidlin Prévost-Bouré N., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Maron P.-A., Ranjard L. (2016). Predictive model of soil molecular microbial biomass. *Ecological Indicators*, 64: 203-11.
- Imbert C., Santorufo L., Ortega C., Jolivet C., Auclerc A., Bougon N., Capowiez Y., Chauvel B., Cheviron N., Cluzeau D. (2023). Handbook to establish a large-scale soil biodiversity monitoring: the French experience of the RMQS-Biodiversity. Copernicus Meetings.
- Imbert C., Santorufo L., Ortega C., Jolivet C., Bougon N., Cheviron N., Cluzeau D., Cortet J., Lévêque A., Mougin C., Murat C., Pérès G., Pottier J., Ranjard L., Villenave C., Bispo A. (2021). Le RMQS comme support pour suivre la biodiversité : les programmes passés, présents et futurs. *Etude et Gestion des Sols*, Numéro spécial 20 ans du RMQS 28, 193-205.
- Imbert C., Valé M., Lévêque A., Jolivet C., Bispo A. (2024). Vers une stratégie du GIS Sol pour la connaissance et la protection de la biodiversité des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 31:31-42.
- Institut National de la Recherche Agronomique, Association marnaise de développement agricole et viticole, Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA), Chambre Départementale d'Agriculture des Ardennes, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Aube, Chambre Départementale d'Agriculture du Calvados, Chambre Départementale d'Agriculture de Charente, Chambre Départementale d'Agriculture de Charente-Maritime, Chambre Départementale d'Agriculture du Cher, Chambre Départementale d'Agriculture de Corrèze, Chambre Départementale d'Agriculture de la Côte d'Or, Chambre Départementale d'Agriculture de Creuse, Chambre Départementale d'Agriculture des Deux-Sèvres, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Eure, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Eure-et-Loir, Chambre Départementale d'Agriculture de Haute-Marne, Chambre Départementale d'Agriculture de Haute-Vienne, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Indre, Chambre Départementale d'Agriculture de Loire-Atlantique, Chambre Départementale d'Agriculture de Mayenne, Chambre Départementale d'Agriculture de la Manche, Chambre Départementale d'Agriculture de la Nièvre, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Orne, Chambre Départementale d'Agriculture de Saône-et-Loire, Chambre Départementale d'Agriculture de Seine-et-Marne, Chambre Départementale d'Agriculture de Seine-Maritime, Chambre Départementale d'Agriculture de Vendée, Chambre Départementale d'Agriculture de la Vienne, Chambre Départementale d'Agriculture de l'Yonne, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine, Chambre Régionale d'Agriculture de Picardie, Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes, Conseil Général de Mayenne, École nationale d'ingénieurs des travaux agricoles de Bordeaux (ENITAB), EDIACARA, Établissement national d'enseignement supérieur agronomique de Dijon (ENESAD), Genevois-Gomendy-Sol et Environnement, Groupe Régional Agronomie Pédologie Environnement (GRAPE Franche-Comté), Institut Forestier National (IFN), Institut National d'Horticulture d'Angers (INH), Institut National Polytechnique - Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse (INP-ENSAT), Institut Supérieur d'Agriculture de Lille (ISA), SCITERRE, Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale (SCP), Sol Info Rhône Alpes - Chambre Régionale d'Agriculture de Rhône-Alpes (SIRA) (2021). Analyses physico-chimiques des sites du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) du territoire métropolitain pour la 1^{re} campagne (2000-2009), avec coordonnées théoriques. Portail Data INRAE. <https://doi.org/10.15454/QSXKGA>
- IPBES (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Diaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
- Jolivet C. C., Boulonne L., Ratié C. (2006). Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). <https://hal.inrae.fr/hal-02818011>
- Karimi B., Chemidlin Prévost-Bouré N., Dequiedt S., Terrat S., Ranjard L. (2018a). Atlas Français des bactéries du sol. BIOTOPE. 192 p. <https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-02067268>
- Karimi B., Terrat S., Dequiedt S., Saby N.P.A., Horrigue W., Lelièvre M., Nowak V., Jolivet C., Arrouays A., Wincker P. (2018b). Biogeography of soil bacteria and archaea across France. *Science advances*, 4 (7): eaat1808.
- 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.
- Lagacherie, P., Arrouays D., Walter C. (2013). Cartographie numérique des sols : principe, mise en œuvre et potentialités. *Etude et Gestion des Sols*, 20 (1) : 83-98.
- Lagacherie P., McBratney A. B., Voltz M. (2007). Digital soil mapping: an introductory perspective. 1st ed. *Developments in soil science*, 31. Amsterdam ; Boston: Elsevier. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00943_6.x
- 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 Conservation des Sols de France : volet Référentiel Régional Pédologique. *Etude et Gestion des Sols*, 21(1) : 121-140.
- Le Bas C., Antoni V., Bispo A., Brunet J.-F., Bougon N., et al. (2022). 20 ans du GIS Sol. Enquête utilisateurs sur les besoins en matière de données sur les sols. *Restitution des résultats. GIS Sol*. 2022, 45 p.
- Le Bas C., Brossard M., Brunet J.-F., Commagnac L., Beaudou A., Belbeze S., Bellifa M., Boukir H., Dalmasso M., Derrière N., Lattelas C., Le Martret H., Lehmann S., Pickel A., Richer-De-Forges A.C., Saby N.P.A., Schellenberger A., Taffoureau E., Toutain B., Wurpillot S., Yahiaoui R. (2024). Le système d'information sur les sols de France : capitaliser, analyser, diffuser, aller vers l'open data. *Etude et Gestion des Sols*. 31:59-73.
- Le Bas C., Messant A., Toutain B., Lehmann S., Bertouy B., Boulonne L., Chenu J.-P., Héliès F., Langlois V., Laroche B., Martin M.P., Ratié C., Richer-De-Forges A.C., Saby N.P.A., Schellenberger A., Arrouays D., Bardy M., Bispo A. (2019). #DonnéeSol ou comment accéder aux résultats et aux données du GIS Sol en 3 clics ! 4. rencontres nationales de la recherche sur les sites & sols pollués, Ademe, Nov 2019, Paris, France.
- Lehmann J., Bossio D.A., Kögel-Knabner I., Rilling M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Leleux A., Arousseau P., Roudaut A. (1988). Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre. *Science du Sol*, 26 (1): 29-40.
- Lemercier, B., Gaudin, L., Walter, C., Arousseau, P., Arrouays, D., Schwartz, C., Saby, N., Follain, S., Abrassart, J. (2008). Soil phosphorus monitoring at the regional level by means of a soil test database. *Soil Use and Management* 24, 131–138.
- Lemercier B., Lagacherie P., Amelin J., Sauter J., Richer-de-Forges A.C., Arrouays D. (2022). Multiscale evaluations of global, national and regional digital soil mapping products in France across regions and soil properties. *Geoderma*, 425, 116052.
- Lemercier B., Walter C., Schwartz C., Saby N., Arrouays D., Follain S. (2006). Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises : Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. *Etude et Gestion des Sols*, 13 (3), 165-180.
- Loiseau T., Richer-de-Forges A.C., Roudier P., Ducommun C., Chen S., Lagacherie P., Arrouays D. (2020b). Essais de représentation cartographique de l'incertitude pour les utilisateurs de cartographies des sols par modélisation statistique, *Etude et Gestion des Sols*. 27, 257-275.

- Marchant B.P., Saby N.P.A., Arrouays D. (2017). A Survey of Topsoil Arsenic and Mercury Concentrations across France. *Chemosphere*, 181 (août) : 635-44. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.106>
- Martin M. (2018). CSOPRA : méthodes de comptabilisation du stockage de carbone organique des sols sous l'effet des pratiques culturales. Produire autrement - Expertises. <https://bibliothèque.ademe.fr/produire-autrement/294-csopra-methodes-de-comptabilisation-du-stockage-de-carbone-organique-des-sols-sous-l-effet-des-pratiques-culturales.html>
- Martin M.P., Arrouays D., Barré P., Boulonne L., Cécillon L., Chen S., Chenu C., Eglin T., Guenet B., Meersmans J., Mulder V.L., Saby N.P.A. (2022). Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols pour l'étude du carbone organique des sols en France métropolitaine. *Avancées scientifiques et applications. Étude et Gestion des Sols*, 29, 327-349.
- Martin M.P., Dimassi B., Roman 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.
- Martin M., Dimassi B., Boulonne L., Bouthier A., Duparque A., Eglin T., Guenet B., Huard F., Makovski D., Mary B. (2019a). Integrating data and models for national SOC monitoring and reporting: implementation for French croplands. *Geophysical Research Abstract*, 21.
- Martin, M.P., Duparque A., Bispo A., Saby N.P.A., Guenet B. (2024). Les données du GIS Sol pour appuyer les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. *Étude et Gestion des Sols*, 31:91-102.
- Martin M., Saby N., Toutain B., Chenu J.-P., Ratié C., Boulonne L. (2019b). Statistiques sur les stocks de carbone (0-30 cm) des sols du réseau RMQS. Portail Data INRAE. <https://doi.org/10.15454/RURZXN>
- Mason E., Chavrit D., Héliès F., Jolivet C., Arrouays A., Bispo A. (2023). EGS : Bilan des 20 premières années des productions scientifiques du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS). *Étude et Gestion des Sols*, 30, 307-322
- Meersmans J., Martin M. P., Lacarce E., De Baets S., Jolivet C., Boulonne L., Lehmann S., Saby N.P.A., Bispo A., Arrouays D. (2012). A high resolution map of French soil organic carbon. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (4): 841-51.
- Meersmans J., Martin M. P., Lacarce E., Orton T.G., De Baets S., Gourrat M., Saby N., Wetterlind J., Bispo A., Quine T.A., Arrouays D. (2013). Estimation of Soil Carbon Input in France: An Inverse Modelling Approach. *Pedosphere* 23 (4): 422-36. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60035-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60035-1)
- 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 la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2022). Démarche établissements sensibles <http://ssp-infoterre.brgm.fr/page/demarche-etablissements-sensibles>
- Morvan X., Saby N.P., Arrouays D., Le Bas C., Jones R.J., Verheijen F.G., Bellamy P.H., Stephens M., Kibblewhite, M. (2008). Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonisation. *The Science of the total environment*, 391 1, 1-12.
- Mossmann J.R., Lafeuille C., avec la collaboration de Demeyer L. (2015). Programme de définition d'un référentiel du sous-sol de Lille Métropole à partir du référentiel pédogéochimique régional Nord-Pas de Calais. Rapport final. BRGM/RP-65145-FR, 195 p.
- Nicolas, M., C. Jolivet, et M. Jonard. (2014). How monitoring networks contribute to the understanding and to the management of soil and forest ecosystems? *Revue Forestière Française*, no SP, <https://doi.org/10.4267/2042/56268>
- Oliva P., Rigou L., Hatet A. (2023). Le programme RMQS2 : témoignages autour d'un programme aux vertus pédagogiques et aux pratiques qualifiantes. *Étude et Gestion des Sols*, 30, 65-74.
- Orgiazzi A., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Fernández-Ugalde O. (2018). LUCAS Soil, the Largest Expandable Soil Dataset for Europe: A Review. *European Journal of Soil Science*, 69 (1): 140-53. <https://doi.org/10.1111/ejss.12499>
- Orton T. G., Saby N. P. A., Arrouays D., Jolivet C. C., Villanneau E. J., Marchant B. P., Caria G., Barriuso E., Bispo A., Briand O. (2013). Spatial distribution of Lindane concentration in topsoil across France. *Science of the total environment*, 443: 338-50.
- Palazot, M., Soccalingame, L., Froger, C., Jolivet, C., Bispo, A., Kedzierski, M., & Bruzard, S. (2024). First national reference of microplastic contamination of French soils. *Science of The Total Environment*, 170564.
- Party J.-P., Granier A. (2014). Données de sols dans la forêt française : état sommaire de l'existant et intérêt de leur mobilisation. *Étude et Gestion des Sols*, 21 : 103-112. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/04/EGS_21_1_2108_Party_foret_03_112.pdf
- Pellerin S., Bamière L., Savini I., Réchauchère O. (2021). Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et quel coût ? Matière à débattre et décider. Versailles : Éditions Quae, 232 p.
- Poggio L., de Sousa L. M., Batjes N. H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing Soil Information for the Globe with Quantified Spatial Uncertainty. *SOIL*, 7 (1): 217-40. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Qu, D. (2022). Des sols sains pour une population et une planète en bonne santé: la FAO appelle à inverser le processus de dégradation des sols. Newsroom. 2022. https://www.fao.org/newsroom/detail/agriculture-soils-degradation-FAO-GFFA-2022/fr?fbclid=IwAR0fJZVMWryqNwB-0SqxudtuyfZ8M0jSkknUX_OW8Mx9RQWmjoFZAnDXuQ
- Ranjard L., Sauter J., Auclerc A., Chauvin C., Cluzeau D., Mereau D., Loiseau-Dubosc P., Lemercier B., d'Oiron E., Raous S., Roturier C., Rovillé M., Serin L., Gascuel C. (2022). Sciences et recherches participatives sur les sols en France : bilan et perspectives. *Étude et Gestion des Sols*, 29 : 381-393.
- Ratié C., Richer-De-Forges A. C., Berché P., Boulonne L., Toutain B., Saby N., 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.
- Renault P., Gascuel C., Cousin I., Antoni V., Bispo A., Bougon N., Desrousseaux M., Feix I., Joassard I., Laville P., Pierart A., Caquet T. (2023). Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société. *Étude et Gestion des Sols* 30:207-222.
- Rennes S., Le Bas C., Le Bideau S., Hissel F. (2023). Prendre en compte le statut juridique des données dans les programmes du GIS Sol. *Étude et Gestion des Sols*. 30:253-262.
- 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., Baffet M., Berger C., Coste S., Courbe C., Jalabert S., Lacassin J.-C., Maillan S., Michel F., Moulin J., Party J.-P., Renouard C., Sauter J., Scheurer O., Verbèqbe 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., Lagacherie P., Arrouays D., Bialkowski A., Bourennane H., Briottet X., Fouad Y., Gomez C., Jacquemoud S., Lemercier B., Maisongrande P., Martelet G., Martin M.P., Michot D., Pichelin P., Saby N.P.A., Tissoux H., Vaudour E., Wadoux A.M.J.-C., Walter C., Puissant A. (2022). The Theia « Digital Soil Mapping » Scientific Expertise Centre of France. *Pedometron*, 46, 4-8.
- Saby, N.P.A., Arrouays, D., Antoni, V., Lemercier, B., Follain, S., Walter, C., Schwartz, C., 2008. Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990-2004. *Soil Use and Management* 24, 254-262.

- Saby N.P.A., Marchant B.P., Lark R.M., Jolivet C.C., Arrouays D. (2011). Robust geostatistical prediction of trace elements across France. *Geoderma*, 162: 303-311.
- Saby N. P. A., Thioulouse J., Jolivet C. C., Ratié C., Boulonne L., Bispo A., Arrouays D. (2009). Multivariate analysis of the spatial patterns of 8 trace elements using the French soil monitoring network data. *Science of the Total Environment*, 407 (21): 5644-52.
- Saby N., Schwartz C., Walter C., Arrouays D., Lemerrier B., Roland N., Squiviant H. (2004). Base de données d'analyses de terre: procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000. *Etude et Gestion des Sols*, 11 (3): 235-253.
- Saby, N., Swiderski, C., Lemerrier, B., Walter, C., Louis, B., Eveillard, P., Arrouays, D., 2017. Is pH increasing in the noncalcareous topsoils of France under agricultural management? A statistical framework to overcome the limitations of a soil test database. *Soil Use and Management* 33, 460–470.
- Saby N., Villanneau E., Toutain B., Arrouays D. (2018). Seuils de détection d'anomalies pour une série d'éléments traces métalliques (RMQS). Portail Data INRAE. <https://doi.org/10.15454/UEZXBY>
- Scheurer O., Saby N, Lemerrier B. (2016). Distribution des analyses de Carbone organique de la BDAT par type de sol : Essai de méthode analytique simplifiée dans le Tardenois en vue d'un bilan de carbone organique des sols cultivés. Séminaire IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols), Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural (SAFER), Apr 2016, Caen.
- Schwartz C., Walter C., Claudot B., Bouédo T., Arousseau P. (1997). Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994. *Étude et Gestion des Sols*, 4 (3), 191-204.
- Swiderski C., Saby N., Boulonne L., Jolivet C., Cousin I. (2017). Méthodologie d'élaboration du plan d'échantillonnage de la deuxième campagne du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France par intégration multi-critères : capacité à détecter une évolution temporelle, évaluation du réservoir en eau utilisable et contraintes logistiques. *Etude et Gestion des Sols*, 24, 83-98.
- Swiderski, C., Saby, N., Party, J.-P., Sauter, J., Köller, R., Vandijk, P., Lemerrier, B., Arrouays, D. (2012). Evolution des teneurs en carbone organique dans l'horizon de surface des sols cultivés en Alsace : Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. *Étude et Gestion des sols*, 19, 179–192.
- Terrat S, Horrigue W, Dequiedt S, Saby NPA, Lelièvre M, Nowak V., Tripied J., Régnier T., Jolivet C., Arrouays D. (2017). Mapping and predictive variations of soil bacterial richness across France. *PLoS one* 12 (10): e0186766.
- Toutain B. (2013). Evolution du système d'information Donesol. Séminaire IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols), Dec 2013, Rennes, France. pp.14.
- Ulrich E. (1995). Le réseau RENECOFOR : objectifs et réalisation. *Revue forestière française*, XLVII, 2, 107-124.
- Vaudour, E., Gholizadeh A., Castaldi F., Saberioon M., Borůvka L., Urbina-Salazar D., Fouad Y, Arrouays D., Richer-de-Forges A.C., Binay J., Wetterlind J., Van Wesemael B. (2022). Satellite Imagery to Map Topsoil Organic Carbon Content over Cultivated Areas: An Overview. *Remote Sensing* 14 (12): 2917. <https://doi.org/10.3390/rs14122917>
- Vaudour E., Gomez C., Lagacherie P., Loiseau T., Baghdadi N., Urbina-Salazar D., Loubet B., Arrouays, D. (2021). Temporal mosaicking approaches of Sentinel-2 images for extending topsoil organic carbon content mapping in croplands. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 96, 102277.
- Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B., Richer de Forges A., Sauter J., Schnebelen N. (2018). La cartographie des sols en France : Etat des lieux et perspectives. Synthèse du rapport. INRA, France, 22 p.
- Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B., Richer-de-Forges A.C., Sauter J., Schnebelen N. (2020). Possible futures of soil mapping in France. *Geoderma Regional*, 23, e00334.
- Walter C., Bouedo T., Arousseau P. (1995). Mapping of soil organic matter content in Brittany and analysis of the temporal evolution between 1980 and 1995. Report, Agrocampus Ouest ; ENSA de Rennes ; UMR SAS, 65 rue de Saint-Brieuc, 35000 Rennes. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4203.6642>
- Walter C., Schwartz C., Claudot B., Bouedo 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.

