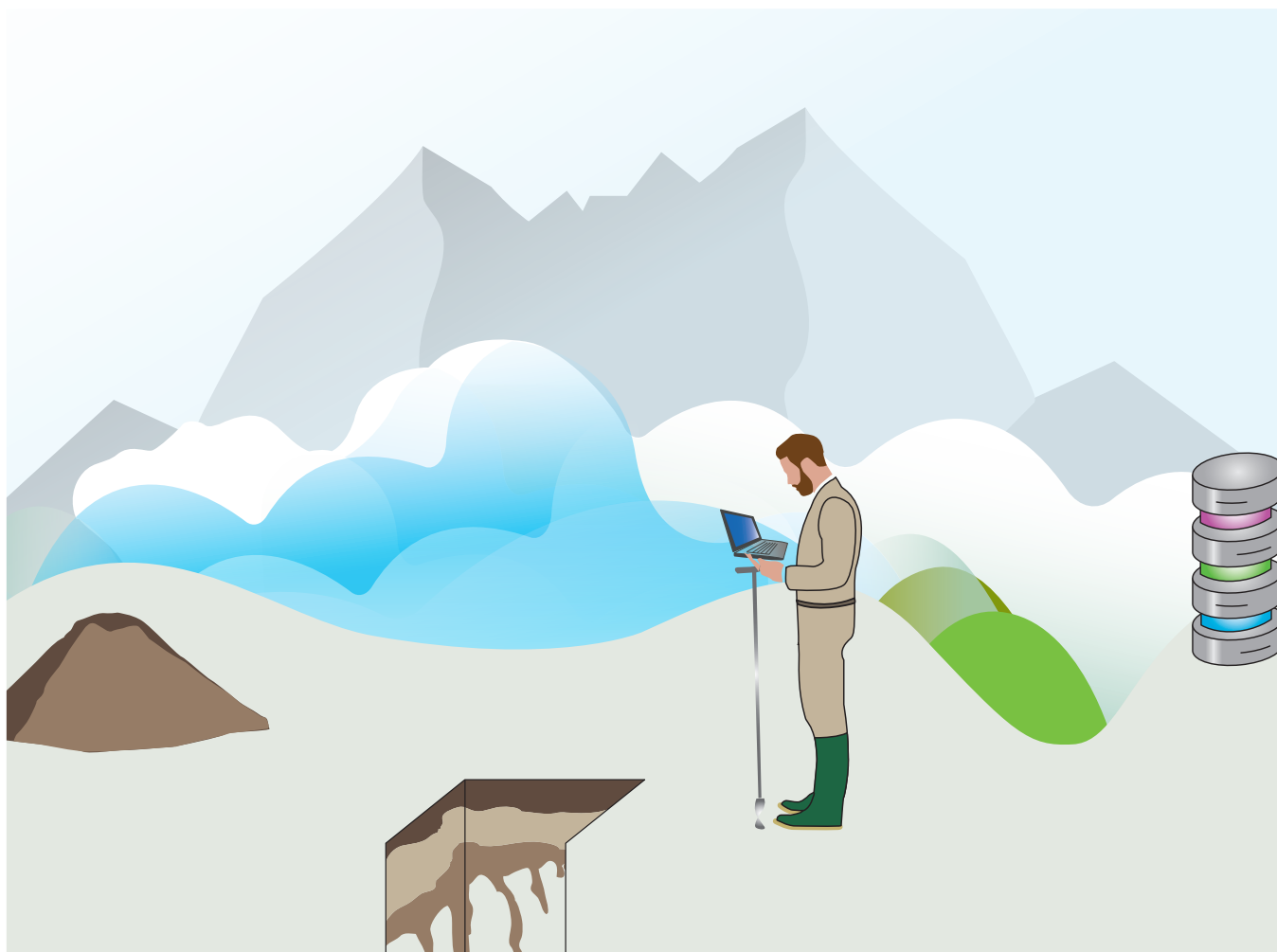


Étude et Gestion des Sols

Numéro spécial
« Les 20 ans du GIS Sol »



Soutenu par

Préface par les co-Présidents du GIS Sol

Paul Hennart⁽¹⁾ et Béatrice Michalland⁽²⁾

- 1) Adjoint au Sous-Directeur de la Performance Environnementale
Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises
Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. France
- 2) Sous-directrice de l'information environnementale,
Commissariat général au développement durable
Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche
et de la Cohésion des territoires. France.

En France, les missions gravitant autour de la surveillance et de la connaissance des sols sont coordonnées depuis 2001 par Le Groupement d'intérêt scientifique sur les Sols (GIS Sol) qui fédère actuellement INRAE, l'ADEME, l'IRD, l'IGN, l'OFB et le BRGM, selon leur ordre d'entrée dans le GIS Sol, sous la co-présidence des ministères chargés de l'agriculture (DGPE/SDPE) et de l'environnement (CGDD/SDES). Le GIS Sol a ainsi pour mission de « *Concevoir, orienter, coordonner et assurer des actions d'inventaire des sols et de suivi de leur qualité, notamment par le déploiement d'indicateurs permettant la mise en place et l'évaluation de politiques publiques (exemple : SNB, SNBC, ZAN, PAC...)* ». Il réalise ainsi l'acquisition, la capitalisation et la mise à disposition des données sur les sols de France, tant au plan de leur cartographie que du suivi de l'évolution de leurs propriétés, répondant aux demandes des pouvoirs publics et de la société, quel que soit le secteur d'activité considéré.

En 2021, à l'occasion des 20 ans du GIS Sol, différents événements ont été organisés : un concours de création d'outils numériques pour améliorer la diffusion des données du GIS Sol en faisant appel aux sciences participatives, une enquête auprès des utilisateurs des données sur les sols pour mieux connaître leurs attentes et besoins, et enfin l'organisation d'une journée le 6 décembre 2021, qui a permis de présenter les actions conduites depuis sa création en 2001 et notamment, l'offre d'informations disponible sur les sols.

Depuis les événements qui ont marqués la célébration des 20 ans d'existence du GIS Sol, de nombreux autres faits marquants en lien direct avec le GIS Sol sont à mentionner.

Une mission d'évaluation du GIS Sol a été conduite conjointement par l'Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD) et le Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER). Cette mission a permis d'établir un bilan complet des activités du GIS Sol pour la convention-cadre couvrant la période de 2019 à 2024. Les inspecteurs ont recommandé la reconduction du GIS Sol. Ils ont souligné sa capacité à assumer les différentes fonctions qui lui ont été assignées et à s'adapter aux évolutions des besoins liés aux différentes politiques sectorielles actuelles, avec la consolidation d'initiatives déjà engagées mais aussi avec l'extension de ses travaux, déjà en cours, à l'acquisition d'informations sur les sols urbains, la qualité biologique des sols, les contaminants émergents présents dans les sols, l'amélioration de la connaissance des sols d'Outre-mer et une meilleure valorisation et diffusion des informations. S'appuyant sur cette analyse de la mission d'inspection, une nouvelle convention-cadre du GIS Sol a été rédigée et signée début 2025 engageant les partenaires jusqu'en 2031.

L'importance renouvelée des productions du GIS Sol s'inscrit dans un contexte d'avancée des travaux européens, notamment avec les négociations en cours portant sur la

proposition de directive européenne sur *la surveillance et résilience des sols* présentée en juillet 2023 par la Commission européenne. Ce projet de directive, qui comporte une composante importante de surveillance des sols harmonisée à l'échelle de l'Union européenne, ambitionne de pouvoir évaluer la santé des sols à partir d'une base commune d'indicateurs et d'atteindre des sols sains d'ici 2050. Au niveau national, les données acquises dans le cadre du GIS Sol pourront être intégrées dans ce nouveau cadre de surveillance et permettre son optimisation. Nous pourrions également bénéficier de l'Étude IndiQuasol réalisée par la DEPE d'INRAE et finalisée fin 2024 qui dresse un panorama complet et pluridisciplinaire de la qualité des sols nationaux au travers d'un référentiel d'indicateurs des sols évalués et déployés à partir des bases de données des programmes du GIS Sol.

À la suite de la journée de célébration des 20 ans du GIS Sol du 6 décembre 2021, différents articles ont été rédigés et publiés dans la revue EGS. Cette rédaction s'est étalée sur 2 ans. Ils sont maintenant rassemblés dans un numéro spécial. Ce numéro spécial « *La connaissance et la surveillance des sols de France : genèse, programmes, évolutions et perspectives du GIS Sol* » fait part des principaux temps forts de cette journée. Les articles de ce numéro rappellent l'évolution du GIS Sol, de ses fondements à son offre actuelle, les enjeux sociétaux et les politiques majeures en lien avec celle-ci, les outils et plateformes transversales du GIS Sol, et présentent les perspectives d'évolution en vue de répondre à de nouveaux enjeux ou attentes des utilisateurs.

Nous remercions ici toutes les personnes qui se sont impliquées dans la préparation, l'organisation et la mise en œuvre « de l'anniversaire des 20 ans du GIS sol » que ce soit au niveau du concours, de l'enquête et de la journée du 6 décembre 2021. Nos remerciements s'adressent également aux auteurs qui ont permis l'élaboration de ce numéro spécial et aux nombreux relecteurs « de l'ombre » qui ont relu les manuscrits originaux pour permettre par des remarques et propositions judicieuses de les améliorer.

Ce numéro spécial est dédié à la mémoire de Dominique Arrouays qui a mis en place et piloté les grands programmes sur les sols, a participé à la fondation du GIS Sol, une structure et des outils exceptionnels de connaissance des sols.

Passionné par les sols et par son métier, travailleur infatigable, Dominique Arrouays disposait d'une immense expertise sur les sols. Grand spécialiste de cartographie, y compris numérique, des sols, il bénéficiait d'une très grande reconnaissance internationale. Dominique était aussi une personnalité chaleureuse dont chacune et chacun d'entre nous se souvient. Dominique a piloté, en tant que rédacteur en chef de la revue avec Anne Richer-de-Forges (rédacteur en chef adjoint), et a contribué amplement, à ce numéro spécial.

Editorial du numéro spécial

La connaissance et la surveillance des sols de France : genèse, programmes, évolutions et perspectives du GIS Sol

A. Bispo₍₁₎, C. Gascuel-Oudou_(2,3) et B. Laroche₍₁₎

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

2) INRAE, Direction Scientifique Environnement, 75338, Paris Cedex 07, France.

3) INRAE, Institut Agro, UMR SAS, 35000, Rennes, France

Editeurs invités et correspondance : antonio.bispo@inrae.fr; chantal.gascuel@inrae.fr; bertrand.laroche@inrae.fr

En 2001, le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol, <https://www.gissol.fr/>) a été créé, en continuité d'initiatives collectives et en réponse à une préoccupation montante des acteurs des politiques publiques et des scientifiques pour mieux connaître les sols. Son objectif était d'engager leur inventaire de manière réaliste et opérationnelle sur l'ensemble du territoire national, de surveiller leurs évolutions, les sols étant un compartiment de l'environnement fragile, directement et durablement impacté par l'activité humaine, incontournable à la production de nos ressources alimentaires et forestières.

Le 6 décembre 2021, le GIS Sol a fêté 20 ans de travaux au service de la connaissance et la surveillance des sols. Cette journée a permis de faire connaître l'activité du GIS Sol, ses programmes, les données accumulées et leur mobilisation pour différents enjeux de société. Les exposés sont consultables en audio et en visio sur le site internet du GIS Sol (<https://www.gissol.fr/>). Ce numéro spécial de la revue Etude et Gestion des Sols vise à étendre l'audience de cette journée, à mettre à disposition des ressources nouvelles, à la fois plus détaillées et plus larges, une réflexion pour permettre mieux encore

l'archivage, la diffusion, l'utilisation et l'appropriation des données sur les sols, et à dresser un bilan et des perspectives de l'activité du GIS Sol.

Le bilan du GIS Sol est, sur beaucoup de points, très élogieux, et encore améliorable sur d'autres : ce numéro spécial en développe les arguments. Le GIS a su structurer des programmes, les déployer dans la durée malgré des moyens limités et incertains, les faire évoluer en fonction des connaissances scientifiques, des évolutions technologiques et des savoir-faire des partenaires. Il a su élargir les membres et par là même, les compétences du GIS Sol. Il a su créer et animer une véritable communauté d'acteurs, partenaires du GIS Sol et relais opérationnels dans les régions. Les programmes développés par la France, en particulier le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) et la base de données d'analyses de terre (BDAT), sont des exemples pour l'Europe et à l'international. Les moyens consacrés au GIS Sol restent modestes au regard de ceux mis sur d'autres compartiments de l'environnement (eau, air).

Les acteurs expriment encore néanmoins des difficultés pour appréhender et utiliser les données. Les souhaits exprimés sont de consolider l'acquisition de données sur les sols, par des spécialistes des sols qui forment une petite communauté soudée mais fragile, et aussi, de faciliter plus encore leur appropriation au sein de problématiques larges, très intégratrices, telles que la santé, l'aménagement urbain..., par des non spécialistes des sols. Une meilleure démocratisation de la connaissance des sols, notamment par des approches de sciences participatives, elles-mêmes potentiellement pourvoyeuses de données, se fait jour. Des besoins se sont également exprimés sur des champs nouveaux compte tenu des technologies désormais disponibles (biodiversité, contamination...) et sur des échelles plus précises, comme celles du petit territoire, de l'exploitation agricole ou de la parcelle.

La décennie présente, celle des années 2020-2030, est marquée par un nouveau tournant, impulsé de concert par les acteurs des politiques publiques, les scientifiques, le monde économique, aux échelles européenne et nationale. Le sol est partout, montant dans les politiques publiques européennes (stratégie sol, projet de directive cadre, directives sectorielles...) et nationales (loi projet climat et résilience, zéro artificialisation nette...), et ce numéro spécial l'illustre très bien. Cette amplification de la prise en compte du sol induira probablement une demande accrue de données sur les sols. Par comparaison, la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau (DCE) en 2000 a mis à l'agenda l'objectif de préserver et d'améliorer l'état écologique des milieux aquatiques, en relation avec des conditions de référence. Cet objectif a impulsé une dynamique nouvelle des systèmes d'information, pour permettre le rapportage, définir des objectifs de qualité et en déduire des mesures de restauration. Une avancée majeure a été la mise en place d'indicateurs hydromorphologiques, physicochimiques et biologiques, la mise en place de réseaux

de suivi, les recours à un nombre restreint d'indicateurs afin de focaliser les efforts sur des objectifs précis et harmonisés entre pays européens. Des développements sans précédent et des échanges internationaux ont eu lieu. Le sol pourrait à l'instar devenir l'objet d'autant de ces attentions dans cette décennie. La DCE a aussi mis en évidence la fragilité de la notion de référence, la difficulté à distinguer le système « naturel » de celui soumis à des pressions liées à l'activité humaine, notamment à cause du changement climatique. Elle a mis en avant la nécessité d'indicateurs fonctionnels, mais aussi leur faible capacité à répondre à certaines pressions diffuses (dépôts atmosphériques, chaînes trophiques perturbées...).

Ainsi, les notions de santé des sols et de multifonctionnalité des sols augurent bien d'une acquisition de données permettant d'avoir une vision globale des fonctions et services écosystémiques des sols. Parallèlement à cette amplification de la prise en compte des sols dans les politiques publiques, les progrès technologiques vont progressivement augmenter l'offre, permettant une analyse plus détaillée et plus complète des propriétés et des fonctions des sols, dans l'espace et le temps (ADN environnemental, télédétection...). Ces enjeux et la massification probable des données sur les sols interrogent de manière nouvelle le GIS Sol sur ses missions, ses priorités et ses moyens.

Récemment le GIS Sol a sollicité une étude à la direction des études et de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE) d'INRAE, étude restituée fin 2024 (https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/resume_indiquasols_inrae_-_web.pdf). Elle va permettre de progressivement mettre en ligne une offre d'indicateurs en réponse à des besoins des utilisateurs sur les fonctions écologiques des sols.

Ce numéro spécial comprend 12 articles séquencés en quatre parties.

Les trois articles « Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années » (Arrouays *et al.*, 2022), « Le rayonnement et les actions significatives du GIS Sol à l'international » (Arrouays *et al.*, 2023), « Les programmes du GIS Sol, leurs contenus et leurs évolutions » (Bispo *et al.*, 2025) présentent le GIS Sol, sa structure, ses fondements et évolutions, les cinq programmes qui le structurent et leurs évolutions, son action et son rayonnement à l'international. Un focus sur l'outremer s'y ajoute « Le GIS Sol dans les départements et régions d'outre-mer français (Brossard *et al.*, 2023). L'objectif de ces quatre articles est de mieux faire connaître le GIS Sol, l'offre actuelle de données qu'il permet, comment et avec qui il travaille, pour proposer une offre de données sur les sols, en France et dans des initiatives internationales.

Quatre articles partent des enjeux de société et illustrent comment les données sur les sols peuvent être mobilisées dans le cadre de politiques publiques. Ces articles associent des acteurs du GIS Sol et des membres extérieurs qui apportent leur regard

distancié et expriment leurs attentes. Quatre politiques publiques sont ciblées : l'atténuation et l'adaptation au changement climatique (Martin *et al.*, 2024), la santé (Froger *et al.*, 2023), la protection et la gestion de la biodiversité (Imbert *et al.*, 2024), les politiques d'aménagement urbain (Brunet *et al.*, 2023).

Deux articles portent sur des aspects transversaux des données du GIS Sol : le système d'information sur les sols qui capitalise, traite et diffuse les données, qui intègre l'objectif de l'open data (Le Bas *et al.*, 2024) ; le statut juridique des données dans les programmes du GIS Sol (Rennes *et al.*, 2023).

Les deux derniers articles esquissent des perspectives : d'une part, la montée récente de la question des sols dans les politiques publiques et la nécessaire demande en indicateurs de la multifonctionnalité et de la santé des sols qu'elles vont induire (Renault *et al.*, 2023) ; d'autre part, les besoins exprimés des acteurs de la gestion agricole et environnementale, les réponses possibles compte tenu des évolutions des démarches scientifiques et technologiques (Gascuel-Oudou *et al.*, 2023). Nous remercions vivement tous les contributeurs de ce numéro spécial qui ont pu, en plus de leur engagement dans le GIS Sol, dégager du temps pour partager leurs travaux, leurs visions et perspectives. Nous remercions également tous les lecteurs de ces articles.

Nous remercions vivement tous les contributeurs de ce numéro spécial qui ont pu, en plus de leur engagement dans le GIS Sol, dégager du temps pour partager leurs travaux, leurs visions et perspectives. Nous remercions également tous les lecteurs de ces articles.

Nous vous souhaitons une bonne lecture !

BIBLIOGRAPHIE

- 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*. Volume 29, pp. 365-379. <https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-29/>
- Arrouays D., Bispo A., Bardy M., Laroche B., Laville P., Le Bas C., Saby N., Ratié C., Martin M.P., Jolivet C., Richer-de-Forges A.C., Antoni V., Joassard I., Feix I., Brossard M., Soussana J.-F. (2023). Le rayonnement et les actions significatives du GIS Sol à l'international. *Étude et Gestion des Sols*. Volume 30, pp. 83-96. <https://www.afes.fr/ressources/le-rayonnement-et-les-actions-significatives-du-gis-sol-a-l-international/>
- 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., Arrouays D. (2025). Les programmes du GIS Sol : 20 ans d'ajustement en réponse aux enjeux. *Étude et Gestion des Sols*. Volume 32, pp 09-39
- Brossard M., Fujisaki K., Jolivet C., Dupuits Bonin E., Jameux M., Jalabert S., Toulemonde E., Becquer T., Blavet D., Beaudou A., Boulonne L., Desjardins T., Le Martret H., Ratié C. (2023). Le GIS Sol dans les départements et régions d'outre-mer français. Volume 30, 145-168. <https://www.afes.fr/ressources/le-gis-sol-dans-les-departements-et-regions-doutre-mer-francais/>
- 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 – Barrières et stratégies de valorisation. Volume 31, pages 91-102. <https://www.afes.fr/ressources/egs-les-donnees-du-gis-sol-pour-appuyer-les-politiques-dattenuation-et-dadaptation-au-changement-climatique-barrieres-et-strategies-de-valorisation/>
- Froger C., Pelfrène A., Volatier J.L., Roussel H., Marot F., Brunet J.F., Saby N., Bispo A. (2023). L'offre du GIS Sol en appui aux politiques de santé : les données disponibles et leur utilisation pour les politiques publiques et la recherche. Volume 30, 235-252. <https://www.afes.fr/ressources/egs-loffre-du-gis-sol-en-appui-aux-questions-de-sante-les-donnees-disponibles-et-leur-utilisation-pour-les-politiques-publiques-et-la-recherche/>
- 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. Volume 31, pages 31-42. <https://www.afes.fr/ressources/egs-vers-une-strategie-du-gis-sol-pour-la-connaissance-et-la-protection-de-la-biodiversite-des-sols/>
- Brunet J.-F., Branchu P., Eychene C., Belbeze S., Guyonnet D. (2023). L'offre du GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain. Volume 30, pages 195-206. <https://www.afes.fr/ressources/loffre-du-gis-sol-aux-politiques-damenagement-urbain/>
- Le Bas C., Brossard M., Brunet J.-F., Commagnac L., Beaudou A., Belbèze 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., Schellenberger A., Taffoureau E., Toutain B., Wurpillot S., Yahiaoui R. (2024). Le système d'information sur les sols : capitaliser, analyser, diffuser, aller vers l'open data. Volume 31, pages 59 à 76. <https://www.afes.fr/ressources/egs-le-systeme-dinformation-sur-les-sols-de-france-capitaliser-analyser-diffuser-aller-vers-open-data/>
- 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. Volume 30, pages 253-262. <https://www.afes.fr/ressources/prendre-en-compte-le-statut-juridique-des-donnees-dans-les-programmes-du-gis-sol/>
- Renault P., Bispo A., Caquet T., Cousin I., Boulgon N., Feix I., Pierart A., Gascuel-Oudou C. (2023). Des propriétés des sols aux indicateurs de qualité des sols en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société. Volume 30, pages 207-221. <https://www.afes.fr/ressources/des-proprietes-des-sols-aux-indicateurs-de-la-qualite-des-sols-en-appui-aux-politiques-publiques-et-en-reponse-aux-besoins-de-la-societe/>
- Gascuel-Oudou C., Renault P., Antoni V., Arrouays D., Bougon N., Denys S., Fiquepron J., François Y., Ille A., Joassard I., Kaszynski M., Laville P., Le Bas C., Vaudour E., 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*. Volume 30, Pages 51-64. <https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-30/>

Table des matières du numéro spécial

• Préface

Présidents du GIS Sol

• Editorial

La connaissance et la surveillance des sols de France :
genèse, programmes, évolutions et perspectives du GIS Sol
Bispo A., Gascuel-Odoux C., Laroche B.

• Table des matières

Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années
Arrouays D., Stengel P., Feix I., Lesaffre B., Morard V., Bardy M., Bispo A., Laroche B., Caquet T., Juille F., Rabut M., Soussana J.-F., Voltz M., Gascuel-Odoux C.

• Les programmes du GIS Sol : 20 ans d'ajustement en réponse aux enjeux

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-Odoux C., Arrouays D.

• Les données du GIS Sol pour appuyer les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique : barrières et stratégies de valorisation

Martin M. P., Duparque A., Bispo A., Saby N.P.A., Guenet B.

• L'offre du GIS Sol en appui aux questions de santé :

les données disponibles et leur utilisation pour les politiques publiques et la recherche
Froger C., Pelfrène A., Volatier J.-L., Roussel H., Marot F., Brunet J.-F., Saby N.P.A., Bispo A.

• Vers une stratégie du GIS Sol pour la connaissance et la protection de la biodiversité des sols

Imbert C., Valé M., Lévêque A., Jolivet C., Bispo A.

• L'offre du GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain

Brunet J.-F., Branchu P., Eychene C., Belbèze S., Guyonnet D.

• Le GIS Sol dans les départements et régions d'Outre-mer français

Brossard M., Fujisaki K., Jolivet C., Dupuits-Bonnin E., Jameux M., Jalabert S., Toulemonde Le Ny E., Becquer T., Blavet D., Beaudou A., Boulonne L., Desjardins T., Le Martret H., Ratié C.

• Le système d'information sur les sols de France : capitaliser, analyser, diffuser, aller vers l'open data

Le Bas C., Brossard M., Brunet J.-F., Commagnac L., Beaudou A., Belbèze S., Bellifa M., Boukir H., Dalmasso M., Derrière N., Lattelais C., Le Martret H., Lehmann S., Pickel A., Richer-de-Forges A.C., Saby N., Schellenberger A., Taffoureau E., Toutain B., Wurpillot S., Yahiaoui R.

- Prendre en compte le statut juridique des données dans les programmes du GIS Sol
Rennes S., Le Bas C., Le Bideau S., Hissel F.
- Le rayonnement et les actions significatives du GIS Sol à l'international
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.
- Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société
Renault P., Cousin I., Gascuel-Odoux C., Antoni V., Bispo A., Bougon N., Desrousseaux M., Feix I., Joassard I., Laville P., Pierart A., Caquet T.
- 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 ?
Gascuel-Odoux C., Renault P., Antoni V., Arrouays D., Bougon N., Denys S., Fiquepron J., François Y., Ille A., Joassard I., Kaszynski M., Laville P., Le Bas C., Vaudour E. et Bispo A.

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

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

- 1) INRAE, InfoSol, 45075, Orléans, France
- 2) Retraité – Ancien Directeur Scientifique Ecosystèmes Cultivés et Naturels de l'INRA, France
- 3) Ademe, experte nationale « sol », Direction Bioéconomie et Énergies Renouvelables, 49004 Angers, France
- 4) Membre de l'Académie d'Agriculture de France, ancien chef du service de la recherche du ministère chargé de l'environnement, France
- 5) Directeur adjoint de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 45100 Orléans, France, ancien co-président du GIS Sol
- 6) Ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire, Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche, 75 007 Paris, France, ancienne directrice de l'US InfoSol
- 7) INRAE, Collège de Direction, Direction Scientifique Environnement, 75338 Paris Cedex 07, membres des instances de gouvernance du GIS Sol et secrétariat du GIS Sol
- 8) INRAE, Vice-Président international, ancien Directeur Scientifique Environnement, 75338 Paris Cedex 07
- 9) UMR LISAH, Université de Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro 34000 Montpellier, France
- 10) UMR SAS, INRAE, Institut Agro, 35000 Rennes, France

* Auteur correspondant : dominique.arrouays@inrae.fr

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

ACTA : Association de coordination technique agricole
ADEME : Agence de la transition écologique (précédemment Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)
AFB : Agence française pour la biodiversité (2017-2019).
AFES : Association Française pour l'Etude du Sol
ANADEME : Collecte de données nationale sur les sols avant épandage de boues de stations d'épuration. Désormais appelée BDETM
AnaEE : Analyses et Expérimentations pour les Ecosystèmes
ANDRA : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
Arvalis : Arvalis - Institut du végétal : institut technique agricole français.
BDAT : Base de données d'analyses des terres
BDETM : Base de Données des teneurs en Eléments Traces Métalliques
BDSolU : Base de données des analyses de sols urbains

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

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

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

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

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

CDD : Contrat à Durée Déterminée

CDTA : Carte Départementale des Terres Agricoles

CEE : Communauté Economique Européenne

CEES : Conservatoire Européen d'Echantillons de Sols

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

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

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

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

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

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

CPCS : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols

ENSA : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie

DS : Direction Scientifique

ENSA : Ecole Nationale Supérieure Agronomique.

EPA : établissement public de l'État

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

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

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

GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique

GIS Sol : Groupement d'Intérêt Scientifique Sol

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

IFEN : Institut Français de l'Environnement

IFN : Inventaire Forestier national

IGCS : Inventaire, gestion et conservation des sols

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

Ineris : Institut national de l'environnement industriel et des risques

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

IRD : Institut de recherche pour le développement

IRSN : Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire

ISA : Institut Supérieur d'Agriculture

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

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

OZCAR : Observatoires de la zone critique : Applications et recherche

OQS : Observatoire de la qualité des sols

PAC : Politique agricole commune de l'Union Européenne

PLU : Plan local d'urbanisme

PLUi : Plan local d'urbanisme intercommunal

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

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

RMQS : Réseau de mesure de la qualité des sols

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

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

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

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

TGV : Train à Grande Vitesse.

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

RÉSUMÉ

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

Mots-clés

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

SUMMARY

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

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

Key-words

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

RESUMEN

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

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

Palabras clave

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

INTRODUCTION

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

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

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

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

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

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

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

Un long passé historique de cartographie des sols en France

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. LA GENÈSE DU GIS SOL

Les évènements qui ont préfiguré la création du GIS Sol

Le contexte environnemental et politique, sa conjonction avec la recherche

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

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

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

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

Le constat d'un échec relatif

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

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

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

Les prémisses du GIS Sol

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

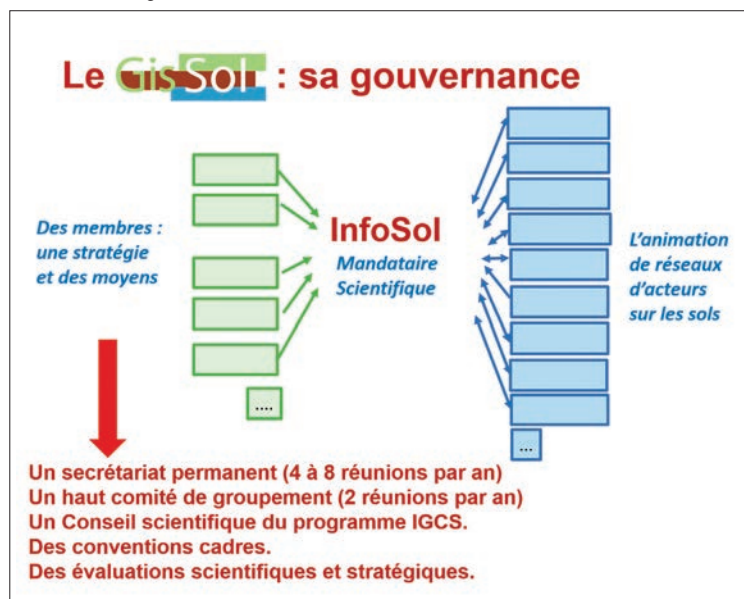
Bien que certaines évaluations stratégiques (voir liens à la fin de cette section) aient généré des questionnements sur le modèle économique et l'absence de conseil scientifique spécifique à l'ensemble du GIS, la structure souple propre aux GIS n'a jamais été remise en cause, car agile et utile, répondant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

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

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

Figure 1 : La gouvernance du GIS Sol

Figure 1: The governance of the GIS Sol



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

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

LES ÉVOLUTIONS DU GIS SOL

Des membres initiaux à aujourd'hui

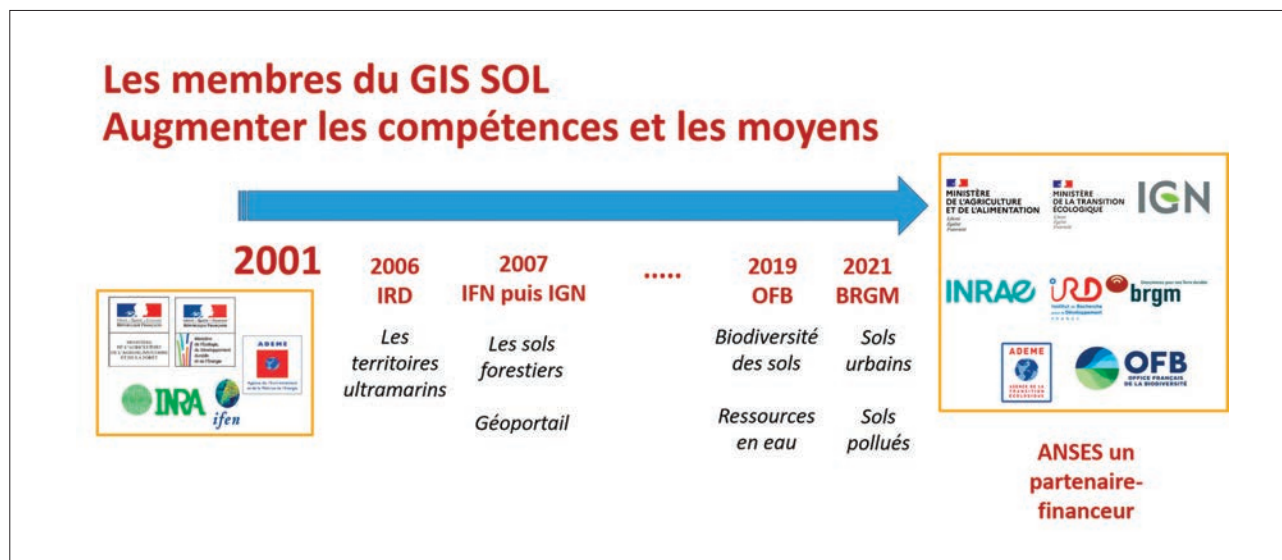
Aux membres fondateurs, les ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement, l'Ifen, qui était alors un établissement public administratif, l'Ademe et INRAE, alors

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Les programmes du GIS Sol et leurs évolutions

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

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

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

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

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

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

Le GIS Sol dans l'environnement européen et mondial

Dès 2008, une revue des réseaux de surveillance des sols en Europe (Morvan *et al.*, 2008) a montré la forte disparité des réseaux de surveillance des sols entre les états membres de l'Union Européenne, voire au sein même de ces états. Une actualisation de cette revue est en cours dans le cadre du programme européen EJP6 « Supporting harmonised soil information and reporting » et des propositions pour des méthodes d'harmonisation sont en cours d'élaboration. Il s'agit en particulier de rendre comparables les réseaux nationaux entre eux, mais également d'élaborer des propositions pour rendre compatibles et inter-opérables les programmes nationaux avec des programmes d'envergure européenne comme le « European Soil Data centre » (ESDAC, Panagos *et al.*, 2012) et le vaste programme européen d'acquisition LUCAS-Soil (Orgiazzi *et al.*, 2018). D'une façon générale, la situation, tant en matière de cartographie traditionnelle et numérique que d'établissements de réseaux de surveillance s'est améliorée dans la plupart des pays européens, ainsi qu'à l'échelle de l'Europe entière avec la mise en place de LUCAS-Soil. Il n'en reste pas moins que de fortes disparités (échantillonnage spatial, vertical et temporel; variables mesurées et techniques de mesure; disponibilité des données...), subsistent encore (Bispo *et al.*, 2021; Bispo *et al.*, 2022). L'un des objectifs du programme EJP6 est de tester des méthodes d'intégration et d'harmonisation, et d'élaborer différents scénarii permettant une meilleure valorisation conjointe de toutes ces données., afin de préparer le déploiement de l'EU SO (European Soil Observatory) (Maréchal *et al.*, 2022).

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

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

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

Quelques faits marquants et indicateurs de réussite du GIS Sol

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

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

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

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

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

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

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

REMERCIEMENTS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

RMT Sols et Territoires (Invitée permanente): Joëlle Sauter

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

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

BIBLIOGRAPHIE

- Adhikari K., Hartemink A.E. (2016). Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, 101-111.
- Arrouays D., King C., Vion I., Le Bissonnais Y. (1996) Detection of soil crusting risks related to low soil organic carbon contents by using discriminant analysis on thematic mapper data. *Geocarto International*, 11 (4):11-16.
- Arrouays D., Vogel H., Eckelmann W., Armstrong-Brown S., Loveland P., Coulter B. (1998). Soil monitoring networks in Europe. 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France, August 1998.
- Arrouays D., Martin S., Leprêtre A., Bourennane H. (2000). Short range spatial variability of metals in an agricultural plot. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 31 (3-4): 387-400.
- Arrouays D., Thorette J., Daroussin J., King D. (2001). Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 8 (1):7-18.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N.P.A., Grolleau E. (2002). Une initiative nouvelle en France: la mise en place d'un Réseau multi-institutionnel de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). *C. R. Acad. Agr. Fr.* 88(5) : 93-105.
- Arrouays D., Grundy M.G., Hartemink A.E., Hempel J.W., Heuvelink G.B.M., Hong S.Y., Lagacherie P., Lelyk G., McBratney A.B., McKenzie N.J., Mendonça-Santos M.d.L., Minasny B., Montanarella L., Odeh I.O.A., Sanchez P.A., Thompson J.A., Zhang G.-L. (2014). GlobalSoilMap: towards a fine-resolution global grid of soil properties. *Advances in Agronomy*, 125, 93-134.
- Arrouays D., Lagacherie P., Hartemink A.E. (2017). Digital soil mapping across the globe. *Geoderma Regional*, 9, 1-4.
- Arrouays D., McBratney, A.B., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A.C., Morgan C., Roudier P., Poggio L., Mulder V.L. (2020). Impressions of digital soil maps: the good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional*. 20, e00255. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>
- Arrouays D., Mulder V.L., Richer-de-Forges A.C. (2021). Soil mapping, digital soil mapping and soil monitoring over large areas and the dimensions of soil security - A review. *Soil Security*, 5, 100018.
- Arrouays D., Dawson L. (2022). Soil Priorities around the World - An introduction. *Geoderma Regional*, 30, e00555, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00555>.
- Baize D., Saby N.P.A., Deslais W., Bispo A., Feix I. (2006). Analyses totales et pseudo-totales d'éléments en traces dans les sols – Principaux résultats et enseignements d'une collecte nationale. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 181-200.
- Baize D., Duigou N., Mathieu A. (2011). Éléments en traces dans les sols. Valeurs de référence locales en île-de-France. *Environnement et Technique*, n°306, pp. 54-56.
- Barthod C. (1994). Le système de surveillance de l'état sanitaire de la forêt en France. *Revue Forestière Française*, XLVI, 5, 564-571.
- Bernoux M., Chenu C., Blanchart E., Eglin T., Bispo A., Bardy M., King D. (2011). Le programme GESSOL 2: impact des pratiques sur les matières organiques les fonctions des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 18 (3), 137-145.
- Bispo A., Guellier C., Martin E., Sapjanskas J., Souvelet H., Chenu C. (eds). (2016). Les sols. Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable. Collection Savoir-faire. Editions Quae, France. 304 p.
- Bispo A., Arrouays D., Saby N.P.A., Boulonne L., Fantappiè M. (2021). Proposal of methodological development for the LUCAS programme in accordance with national monitoring programmes. EJP SOIL - Deliverable 6.3. https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_Deliverable_6.3_Dec_2021_final.pdf
- Bispo A., Fantappiè M., van Egmond F., Smreczak B., Bakacsi Z., Hessel R., Wetterlind J., Siebec G., Jones A. (2022). A review of existing soil monitoring systems to pave the way for the EU Soil Observatory. *World Congress of Soil Science*, 1-5 août 2022, Glasgow, Royaume Uni.

- Bonneau M., Belkacem S., Nys C., Ranger J., Gelhaye D., Lefèvre Y., Humbert D. (2000). Evolution d'un sol forestier acide des Vosges sur une période de 10 ans - Observatoire de la Qualité des Sols du DONON. *Étude et Gestion des Sols*, 7 (2), 99-117.
- Bornand M. (1997). Connaissance et suivi de la qualité des sols en France. Etat des lieux. Enjeux. Besoins en données. Propositions pour une gestion raisonnée de la ressource en sol. Rapport MAPA-MAE-INRA, INRA Montpellier. 176 p.
- Bornand M., Arrouays D., Jamagne M., Baize D. (1989). Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle du 1/250.000. *Science du Sol*, 27(1), 17-20.
- Bouma J. (2014). Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(2), 111-120.
- Caubet M., Román Dobarco M., Arrouays D., Minasny B., Saby N.P.A. (2019). Merging country, continental and global predictions of soil texture: Lessons from ensemble modelling in France. *Geoderma*, 337, 99-110.
- CEE (1987). Règlement (CEE) n° 1696/87 de la Commission du 10 juin 1987 portant certaines modalités d'application du règlement (CEE) n° 3528/86 du Conseil relatif à la protection des forêts dans la Communauté contre la pollution atmosphérique (inventaires, réseau, bilans). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A31987R1696&qid=1603811041011>
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., King C., Antoni V., Surdyk N., Dubus I., Arrouays D., Desprats J.F. (2006). Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n° 3: Synthèse et recommandations générales. BRGM/RP-55104-FR, p. 87.
- Chen S., Mulder V.L., Heuvelink G.B.M., Poggio L., Caubet M., Román Dobarco M., Walter C., Arrouays D. (2020). Model averaging for mapping topsoil organic carbon in France. *Geoderma*, 366, 114237. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114237>
- Citeau L., Bispo A., Bardy M., King D. (eds) (2008). *Gestion durable des sols*. Collection: Savoir-faire. Editions Quae, France. 336 p.
- CPCS. 1967. Classification des sols. CPCS 1967 (Commission de Pédologie et de Cartographie des sols). Editions Association Française pour l'Etude des Sols (AFES), France. 96 p. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/11/CPCS_1967.pdf.
- Duigou N., Baize D. (2010). Nouvelle collecte nationale d'analyses d'éléments en traces dans les sols (horizons de surface) - (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn). Rapport final. Contrat ADEME 0875C0036. 284 pages.
- Duigou N., Baize D., Bispo A. (2011). Utilisation de la base de données BDETM pour obtenir des valeurs de références locales en Éléments Traces Métalliques – Cas de la région Centre. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 91-108.
- Eglin T., Cousin I., Walter C. (2021). Contribution aux réflexions sur les concepts de fonctions des sols et de services écosystémiques, et leur évaluation. *Étude et Gestion des Sols*, 28, 143-146
- Eymard A. (2022). Comparaison d'informations pédologiques de sources différentes. Cohérence, complémentarités, intérêt de leur utilisation conjointe pour la cartographie. Une étude pilote sur les sols forestiers du département du Loiret. Mémoire de fin d'Etudes, Bordeaux Sciences Agro, 40 p + annexes.
- Favrot J.C., Arrouays D., Bornand M., Girard M.C., Hardy R. (1994). Cartographie et gestion des ressources en sol de France: Le programme Inventaire, Gestion et Conservation des sols. *Cahiers d'études et de recherches francophones, Agricolures*, 3(4), 237-246.
- Favrot J.C., Lagacherie P. (1989). La valorisation de l'information pédologique: l'exemple des secteurs de référence drainage. *Science du Sol*, 27(1), 109-112.
- Gaultier J.P., Legros J.P., Bornand M., King D., Favrot J.C., Hardy R. (1993). L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées: le projet DONESOL. *Revue de Géomatique*, 3, 235-253.
- GIS Sol. (2011). L'état des sols de France. Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, France. 187 p. (+ synthèses de 24 p. en français et en anglais). Téléchargeables sur: <https://www.gissol.fr> (dernier accès 8 avril 2022).
- Hervé J.J., Urbano G. (1983). L'opération drainage - secteur de référence ONIC-Ministère de l'Agriculture. Actes du colloque CECENA.
- Jamagne M. (1967). Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Annales Agronomiques* 18, 142 numéro hors-série.
- Jamagne M., Bornand M., Hardy, R. (1989). La cartographie des sols en France à moyenne échelle. Programmes en cours et évolution des démarches. *Science du sol*, 27, 301-318.
- Jamagne M., King D., Le Bas C., Daroussin J. (1995). Development and application of a European soil geographic database. *Eurasian Soil Science*, 27(4), 19-23.
- Jolivet C., Boulonne L., Ratié C. (2006) Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, édition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p.
- Jolivet C., Almeida-Falcon J.-L., Berché P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehmann S., Maître B., Ratié C., Schellenberger E., Soler-Dominguez N. (2018). Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2: deuxième campagne métropolitaine, 2016 – 2027, Version 3, 136 p., INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France, ISBN: 2-7380-1416-X.
- Jolivet C., Chabrit D. (Eds). (En cours d'édition). Les 20 ans du RMQS. *Étude et Gestion des sols*. Numéro spécial « 20 ans du GIS Sol ».
- Journal officiel de la République française. (1961). Loi n° 61-1489 du 26 décembre 1961 relative à l'accueil et à la réinstallation des Français d'outre-mer. *Journal officiel de la République française*. Lois et décrets 11996-11997 n° 0304. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000508788> (dernier accès: 06/04/2022).
- Keesstra S.D., Bouma J., Wallinga J., Tittone P., Smith P., Cerdà A., Montanarella L., Quinton J.N., Pachepsky Y., van der Putten W.H., Bardgett R.D. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2(2), 111-128.
- King D., Jamagne M., Arrouays D., Bornand M., Favrot J.C., Hardy R., Le Bas C., Stengel P. (1999). Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. Etat d'avancement et exemples d'utilisation. *Étude et Gestion des Sols*, 6(4), 215-228.
- Lacarcé E., Le Bas C., Cousin J.-L., Pesty B., Toutain B., Houston Durrant T., Montanarella L. (2009). Data management for monitoring forest soils in Europe for the Biosoil project. *Soil Use and management*, 25, 57-65.
- Laroche B., Richer-de-Forges A.C., Saby N.P.A., Martelet G., Tourlière B., DeParis J., Messner F., Wetterlind J., Moulin J., Froger D., Arrouays D. (2013). Potentiel de la spectrométrie gamma aéroportée pour la cartographie des sols et du régolithe: une mini-revue et des premiers exemples en régions Centre et Limousin. *Étude et Gestion des Sols*, 20(1), 15-28.
- Laroche B., Richer-de-Forges A.C., Leménager S., Arrouays D., Schnebelen N., Eimberck M., Toutain B., Lehmann S., Tientcheu E., Héliès F., Chenu J.-P., Parot S., Desbordes S., Girot G., Voltz M., Bardy M. (2014). Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols. *Volet Référentiel Régional Pédologique*. *Étude et Gestion des Sols*, 21, 125-140.
- Legros J.-P. (1996). Cartographies des sols: de l'analyse spatiale à La gestion des territoires, 1^{re} édition, Collection Gérer l'environnement. Presses Polytechniques et Univ. Romandes, Lausanne, Suisse.
- Legros J.P., Martin S., Baize D., Rivière J.M., Leprêtre A. (2002). Les épandages d'effluents d'élevage en Bretagne - Accumulation de cuivre et de zinc dans une parcelle de l'Observatoire de la qualité des sols (O.Q.S.). pp. 169-182. In: « Les Éléments traces métalliques dans les sols – Approches fonctionnelles et spatiales » D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris. 570 p.
- Loiseau T., Richer-de-Forges A.C., Martelet G., Bialkowski A., Nehlig P., Arrouays D. (2020). Could airborne gamma spectrometric data replace lithological maps as co-variates for digital soil mapping of topsoil particle-size distribution? A case study in Western France. *Geoderma Regional*. 22, e00295.

- Maréchal A., Jones A., Panagos P., Belitrandi D., De Medici D., De Rosa D., Martin Jimenez J., Koeninger J., Labouyrie M., Liakos L., Lugato E., Matthews F., Montanarella L., Muntwyler A., Orgiazzi A., Scarpa S., Schillaci C., Wojda P., Van Liedekerke M., Simoes Vieira D. (2022). EU Soil Observatory 2021, EUR 31152 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-55031-0, doi:10.2760/582573, JRC129999.
- Martin S., Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Ciesielski H., Gaultier J.-P., Lavelle P., Legros J.-P., Leprêtre A., Sterckeman T. (1999). Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observatoire de la Qualité des Sols. *Étude et Gestion des Sols*, 6 (3), p. 215-230.
- Martelet G., Drufin S., Tourlière B., Saby N.P.A., Perrin J., DeParis J., Prognon J.F., Jolivet C., Ratié C., Arrouays D. 2013. Regional regolith parameters prediction using the proxy of airborne gamma ray spectrometry. *Vadose Zone Journal*, 12(4). 1-14. doi:10.2136/vzj2013.01.0003
- McBratney A., Field D.J., Koch A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203–213.
- Messant A., Lehmann S., Moulin J., Lagacherie P., Jalabert S., Noraz A., Lemerrier B., Chafchafi A., Mure J.-P., Laroche B., Sauter J. (2021). Diffusion des Référentiels Régionaux Pédologiques sous la forme d'une carte des sols dominants (France métropolitaine hors-Corse) accessible sur le Géoportail. *Étude et Gestion des Sols*, 28 (1), 57-70.
- Ministère de l'Agriculture (non daté). La Carte des Terres Agricoles. Une gajeure ou une réalité ? Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Aménagement, Paris France. 8 pp. <http://www.lecf.fr/new/articles/97-article-704.pdf>. (dernier accès le 7 avril 2022).
- Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N.J., Badraoui M., Chude V., Baptista I., Mammo T., Yemefack M., Singh Aulakh M., Yagi K., Young Hong S., Vijnarnorn P., Zhang G.-L., Arrouays D., Black H., Krasilnikov P., Sobocká J., Alegre J., Henriquez C.R., Mendonça-Santos MdL., Taboada M., Espinosa-Victoria D., AlShankiti A., AlaviPanah S.K., Elsheikh Z.A.E., Hempel L., Camps Arbestain M., Nachtergaele F., Vargas R. (2016). World's soils are under threat. *SOIL*, 2, 79-82.
- Morvan X.P.P., Saby N.P.A., Arrouays D., Le Bas C., Jones R.J.A., Verheijen F.G.A., Bellamy P.H., Stephens M., Kibblewhite M.G. (2008). Soil monitoring in Europe : a review of existing systems and requirements for harmonisation. *Sci. Tot. Env.*, 391, 1-12.
- Orgiazzi A., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Fernández-Ugalde O. (2018). LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe : a review. *European Journal of Soil Science*, 69, 140–153. doi: 10.1111/ejss.12499.
- Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. (2012). European Soil Data Centre : response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29, 329–338.
- Poggio L., de Sousa L.M., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Riberio E., Rossiter D. (2021). SoilGrids 2.0: producing quality-assessed soil information for the globe. *SOIL*, 7 (1), 217-240. DOI10.5194/soil-7-217-2021.
- Ponette Q., Ulrich E., Brêthes A., Bonneau M., Lanier M. (1997). RENECOFOR. Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau, campagne de mesures 1993/1995. Office National des Forêts, Département des recherches techniques. Fontainebleau (France), 427 p.
- Ratié C., Richer-de-Forges A.C., Berché P., Boulonne L., Toutain B., Saby N.P.A., Chenu J.-P., Laloua D., Ortoland B., Tientcheu E., Soler-Dominguez N., Jolivet C., Arrouays D. (2010). Le Conservatoire des Sols : La mémoire des sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 17 (3), 263-273.
- Richer-de-Forges A.C., Baffet M., Berger C., Coste S., Courbe C., Jalabert S., Lacassin J.-C., Maillant S., Michel F., Moulin J., Party J.-P., Renouard C., Sauter J., Scheurer O., Verbègue B., Desbourdes S., Héliès F., Lehmann S., Saby N.P.A., Tientcheu E., Jamagne M., Laroche B., Bardy M., Voltz M. (2014). La cartographie des sols à moyennes échelles en France métropolitaine. *Étude et Gestion des sols*, 21(1). 25-36.
- Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Bardy M., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B., Sauter J., Voltz M. (2019). Mapping of Soils and Land-Related Environmental attributes in France : analysis of end-users' needs. *Sustainability*, 11, 2940; doi:10.3390/su11102940.
- Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Poggio L., Chen S., Lacoste M., Minasny B., Libohova Z., Roudier P., Mulder V.L., Nédélec H., Martelet G., Lemerrier B., Lagacherie P., Bourennane H. (2022). Hand-feel soil texture observations to evaluate the accuracy of digital soil maps for local prediction of particle size distribution. A case study in central France. *Pedosphere*, online, 5 July 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pedosph.2022.07.009>.
- Saby N.P.A., Lemerrier B., Arrouays D., Leménager S., Louis B.P., Millet F., Paroissien J.-B., Schellenberger E., Squivident H., Swiderski C., Toutain B., Walter C., Bardy M. (2014). Le programme Base de Données d'Analyses de Terre. Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Étude et Gestion des Sols*, 21, 141-150.
- Saby N.P.A., Swiderski C., Lemerrier B., Walter C., Benjamin P., Louis B.P., Eveillard P., Arrouays D. (2017). Is pH increasing in the non-calcareous topsoils of France under agricultural management? A statistical framework to overcome the limitations of a soil test database *Soil Use Manag.*, 33, 460-470.
- Schvartz C., Walter C., Claudot B., Bouédo T., Aourousseau P. (1997). Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 : I. Constitution d'une banque de données cantonales. *Étude et Gestion des Sols*, 4 (3), 191-204.
- SDES. (2021). Compte satellite de l'environnement, 2021. Service des données et études statistiques (SDES). Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires.
- Sigal-Guille C., Demenois J., Chevallier T., Bénédet F., Le Bas C., Bispo A., Corbière P. (sous-pressé). Protection et diffusion des données sur les sols : des règles à comprendre pour mieux les intégrer aux recherches. *Étude et Gestion des Sols*, sous presse.
- Thorette J., Arrouays D. (1999). Proposition pour la mise en place d'un dispositif national d'inventaire et d'observation des sols (DINIOS). Rapport IFEN/INRA. 50 p.
- Ulrich E. (1995). Le réseau RENECOFOR : objectifs et réalisation. *Revue forestière française*, XLVII, 2, 107-124.
- Villanneau E., Perry-Giraud C., Saby N., Jolivet C., Marot F., Maton D., Floch-Barneaud A., Antoni V., Arrouays D. (2008). Détection de valeurs anormales dans les teneurs en ETM des sols, basée sur le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols. *Étude et Gestion des Sols*, 15(3), 183-200.
- Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B., Richer-de-Forges A.C., Sauter J., Schnebel N. (2020). Possible futures of soil mapping in France. *Geoderma Regional*, 23, e00334.
- Voynet D., Hervieu B. (2000). La convention-cadre MATE-INRA. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 39, 87-90.
- Walter C., Schvartz C., Claudot B., Bouédo T., Aourousseau P. (1997). Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 : II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés *Étude et Gestion des Sols*, 4 (3), 205-219.
- Wopereis M.C., Gascuel-Oudoux C., Bourrié G., Soignet G. (1988). Spatial variability of heavy metals in soil on a one hectare scale. *Soil Science*, 146(2), 113-118.

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-Odoux⁽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-Odoux 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 création du Groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS Sol), réunissant les Ministères en charge de l'agriculture et de l'environnement, l'ADEME, l'IFEN et l'INRA, 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 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)

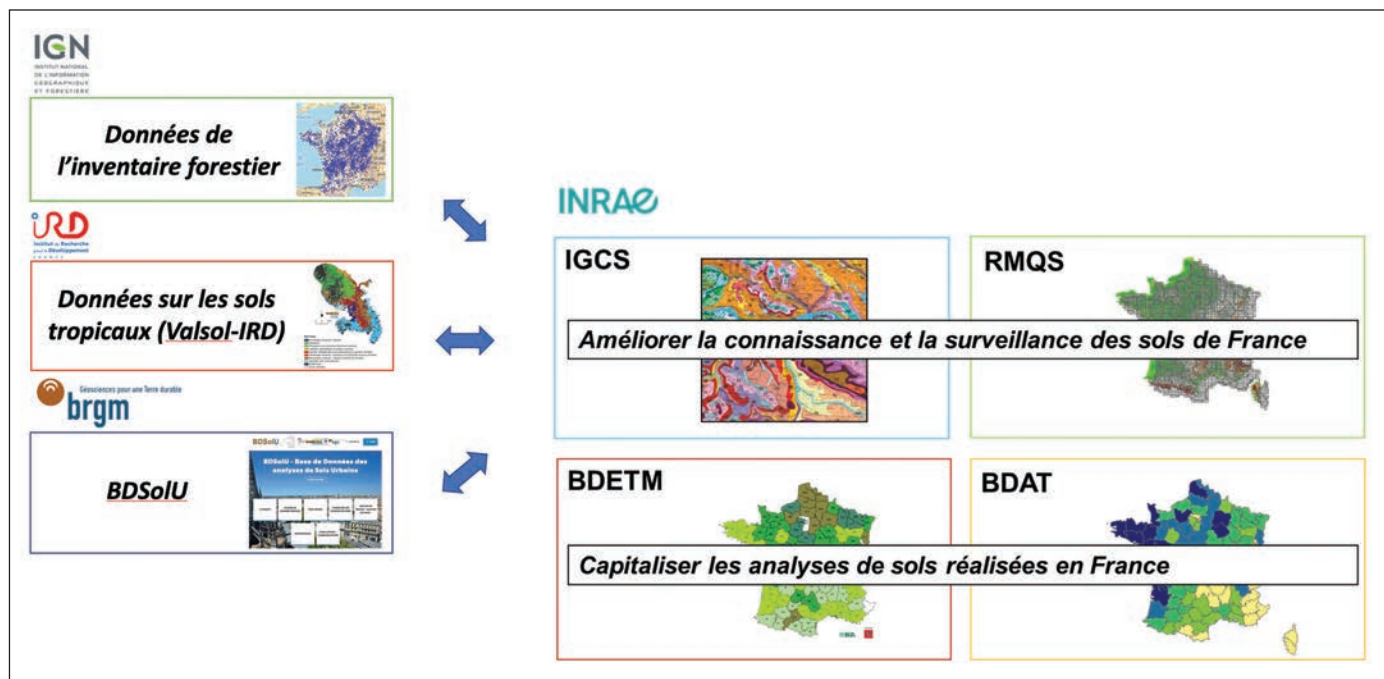
Problèmes		Conséquences
Dégradation physique	- artificialisation – imperméabilisation - compaction - érosion	Pertes en récoltes et terres agricoles, pertes de fonctionnalités épuratrices, baisse de productivité agricole, pollution des cours d'eau...
Dégradation chimique	- acidification - d'origine industrielle - 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	- 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

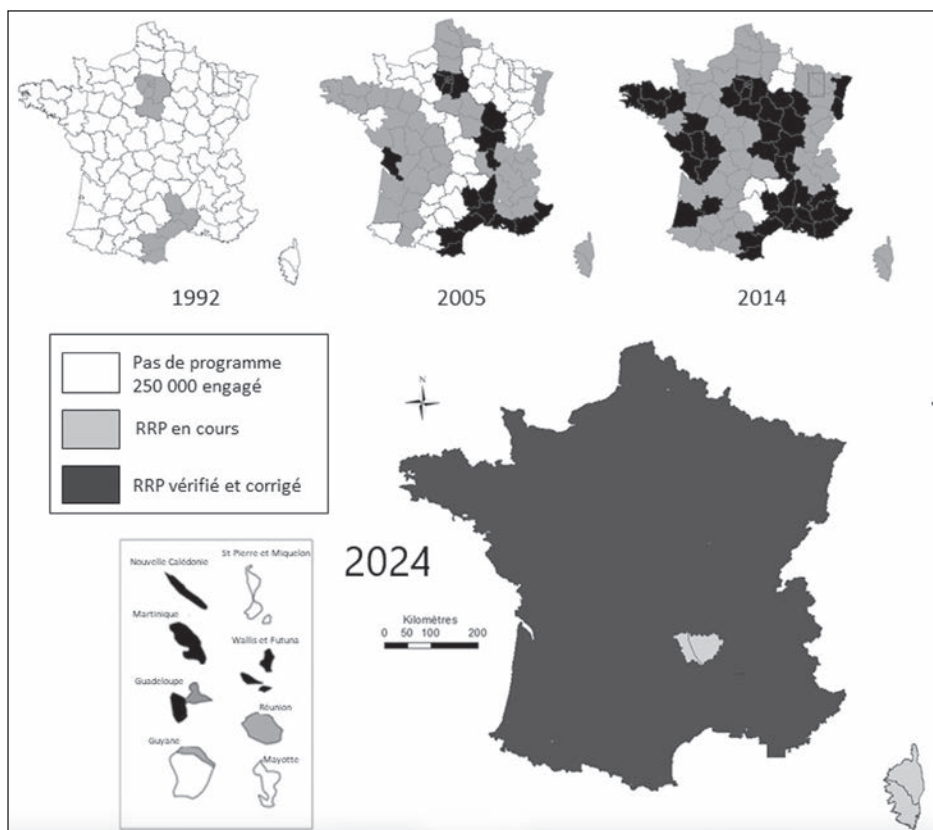
Les inventaires cartographiques initiés dans les années 1960 se sont structurés dans les années 1990 en un programme national unique, le programme IGCS. La principale stratégie a été et reste de capitaliser, sous un format unique DoneSol, les données pédologiques anciennes et d'en acquérir de nouvelles 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

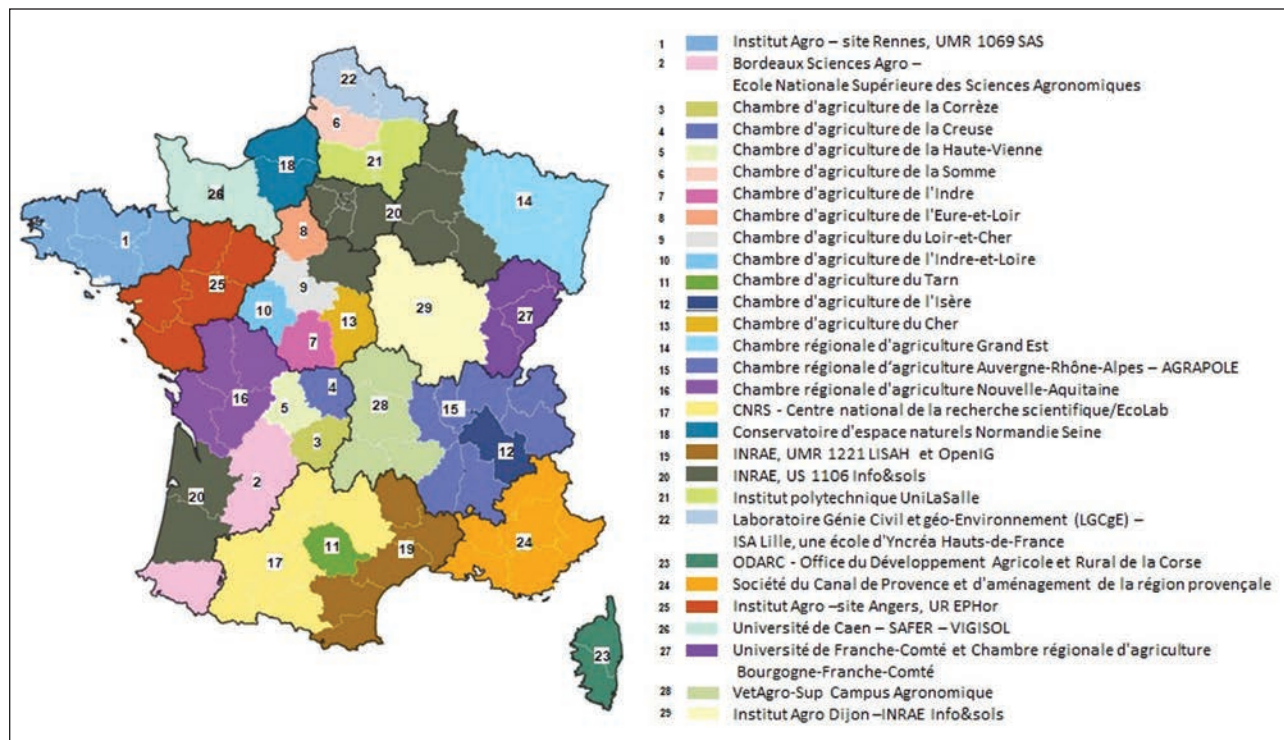
Le programme IGCS est coordonné et piloté par un Conseil scientifique. Les principaux acteurs sont des partenaires locaux qui ont porté ou portent des projets sur leur territoire. Lors du démarrage, seules étaient impliquées des unités INRA notamment pour la mise en place et le test de la méthodologie 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.

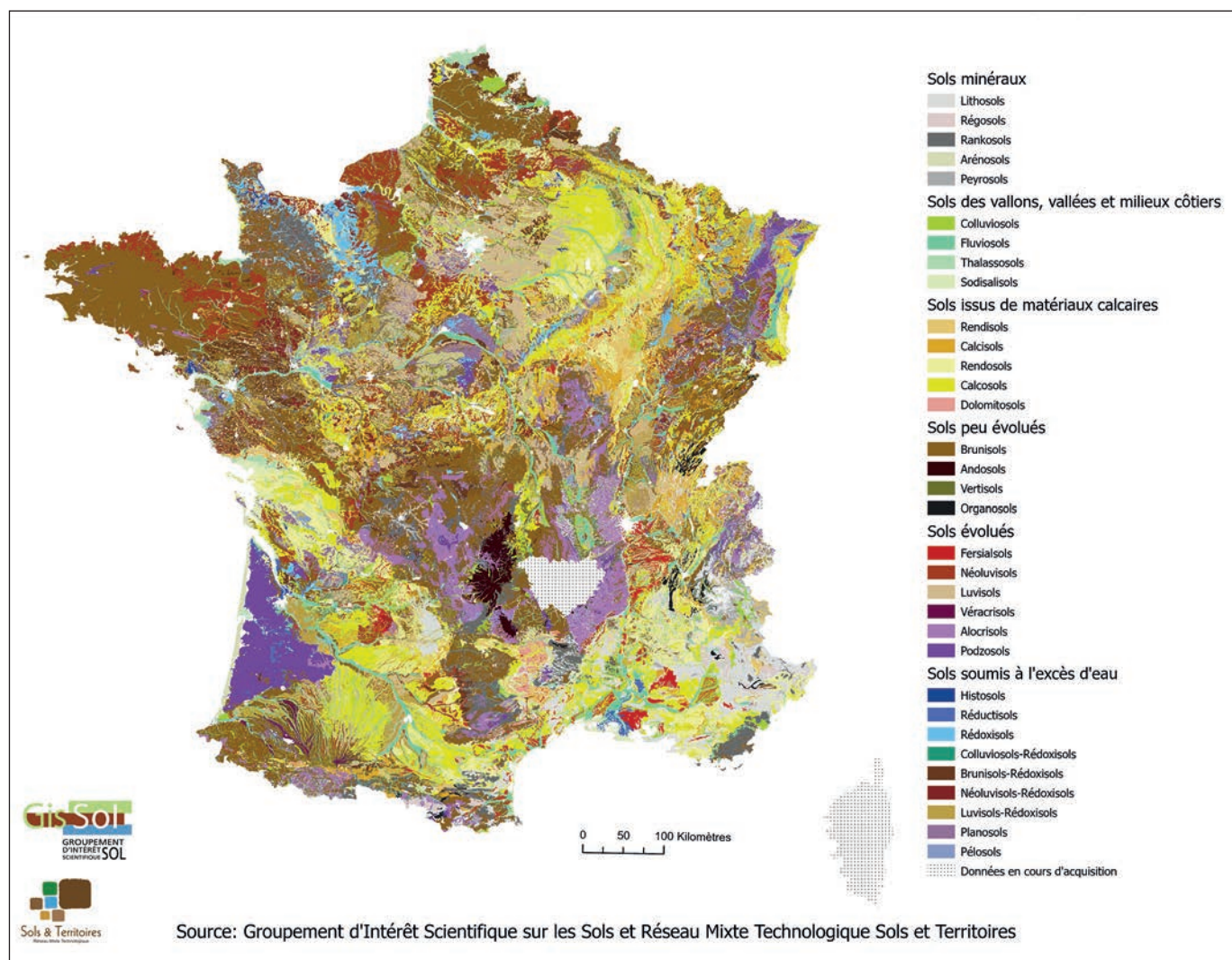
Les réussites

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 ; Lemerrier *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...).

3. LE RÉSEAU DE MESURES DE LA QUALITÉ DES SOLS (PROGRAMME RMQS)

Le démarrage

Au démarrage du GIS Sol (Arrouays *et al.*, 2021, 2022) un groupe de travail a été mis en place pour imaginer le futur réseau national de surveillance des sols, lui fixant les objectifs suivants : (i) pouvoir disposer de statistiques non biaisées sur l'état des sols à l'échelle nationale (fonction de bilan et d'état des lieux initial) ; (ii) couvrir toutes les occupations des sols ; (iii) réaliser un suivi de cet état et détecter des évolutions temporelles ; (iv) détecter d'éventuels gradients (par exemple de contamination diffuse) et pouvoir produire des cartes de l'état des sols de France ; (v) constituer une banque d'échantillons de sols pour pouvoir faire (ou refaire) des analyses a posteriori.

L'idée d'une grille systématique couvrant l'ensemble du territoire s'est imposée assez rapidement afin de fournir des statistiques non biaisées et de couvrir régulièrement l'espace, permettant également des sorties cartographiques. La nécessaire finesse pour représenter les principales combinaisons des occurrences de types et d'occupations des sols, a conduit

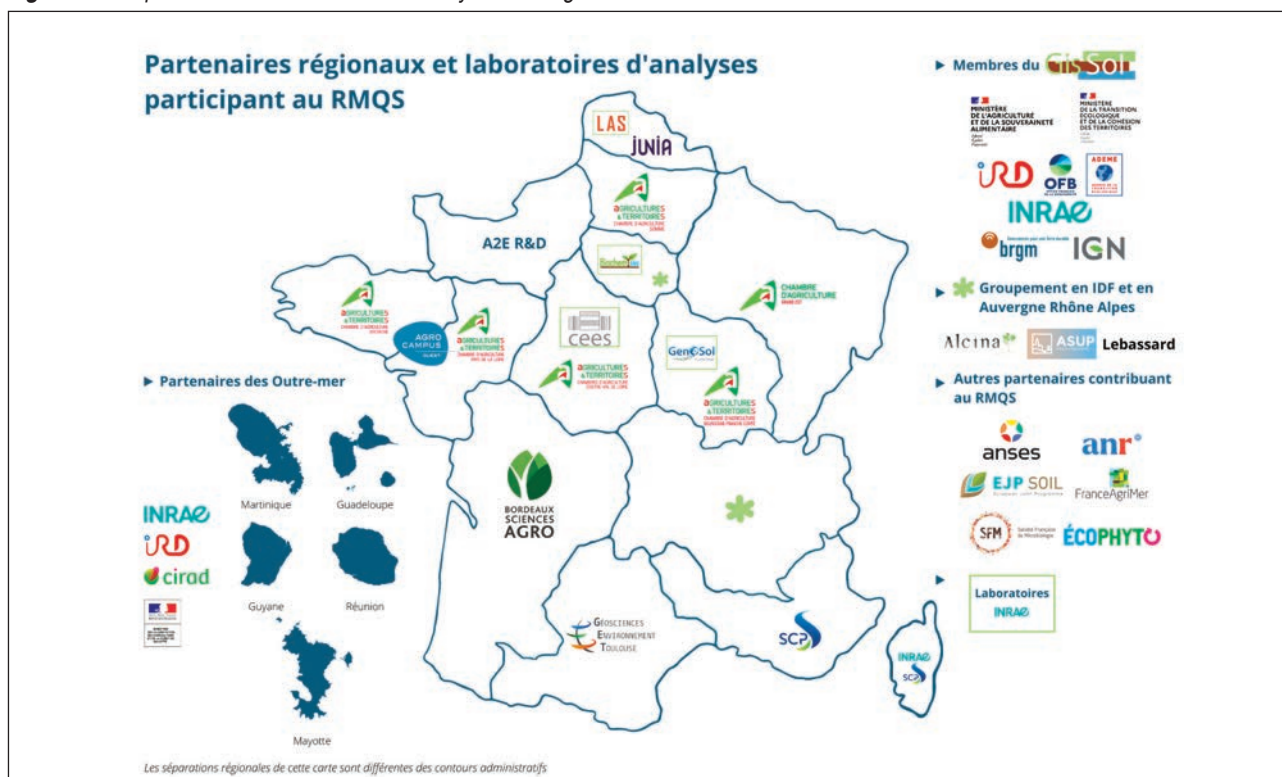
INRAE, après différents tests (Arrouays *et al.*, 2001), à proposer la maille de 16 km (2173 sites sur le territoire métropolitain), compromis entre la représentativité et les coûts engendrés par le déploiement d'un tel réseau (Arrouays *et al.*, 2003). Cette grille a de plus l'avantage de s'aligner avec le Réseau européen de suivi des dommages forestiers, également connu en France sous le nom de « Santé des forêts », qui disposait déjà d'une campagne antérieure menée dans les années 90.

La méthodologie de la première campagne (RMQS1), déduite de différents tests menés par l'Unité InfoSol en début de campagne sur quelques départements, a été adaptée en fonction des retours d'expérience, puis figée à travers un manuel de terrain (Jolivet *et al.*, 2006). Chaque site est repéré avec une bonne précision spatiale, afin de retrouver l'emplacement exact du site à chaque campagne d'échantillonnage. Les sites comportent :

- une fosse pédologique, pour décrire et caractériser le sol et ses horizons jusqu'au matériau parental. Plusieurs séries d'échantillons sont prélevées : échantillons d'horizons pour analyses physico-chimiques, échantillons volumétriques pour évaluer la masse volumique et la teneur en éléments grossiers.
- une surface d'échantillonnage de 20 x 20 m divisée en 100 unités d'échantillonnage de 2 m x 2 m où sont réalisés les prélèvements de sol destinés au suivi temporel des propriétés

Figure 5. Les partenaires du Réseau de mesures de la qualité des sols

Figure 5. The partners of the French Soil Quality Monitoring Network



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.

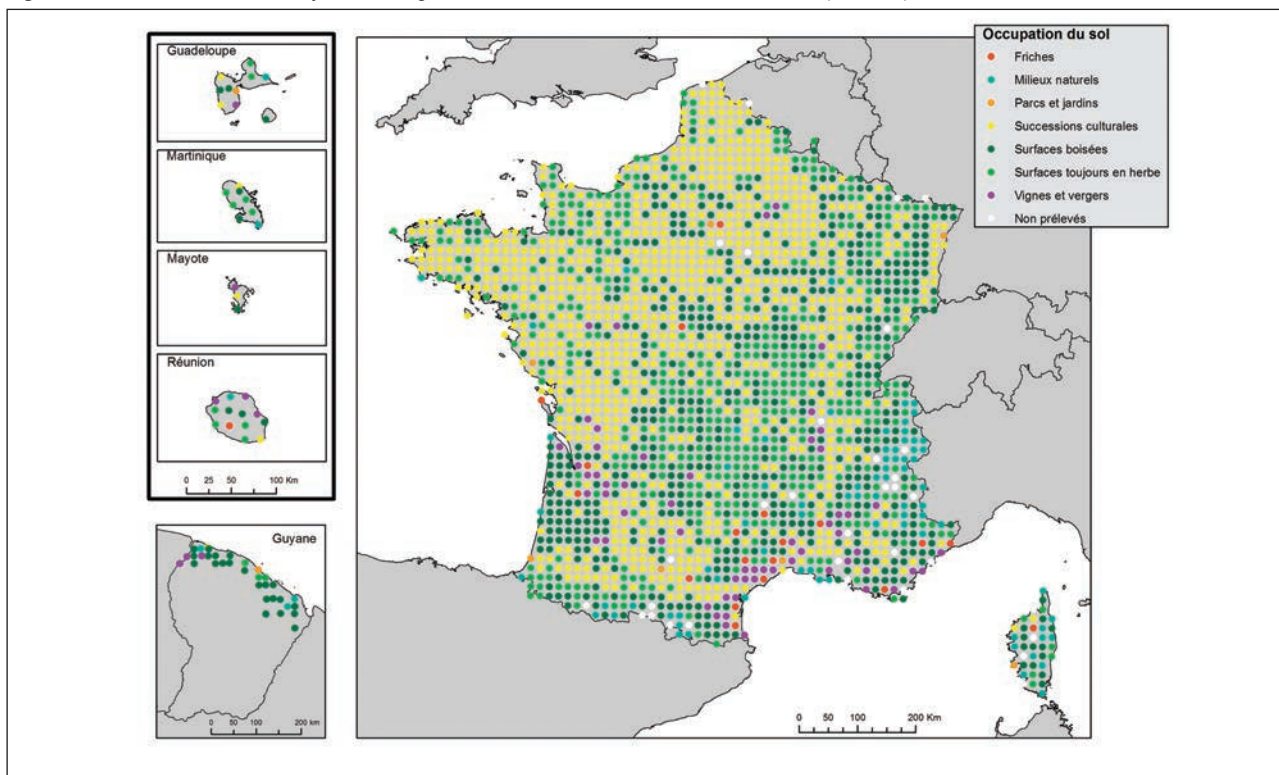
Les principales étapes et grandes avancées

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)



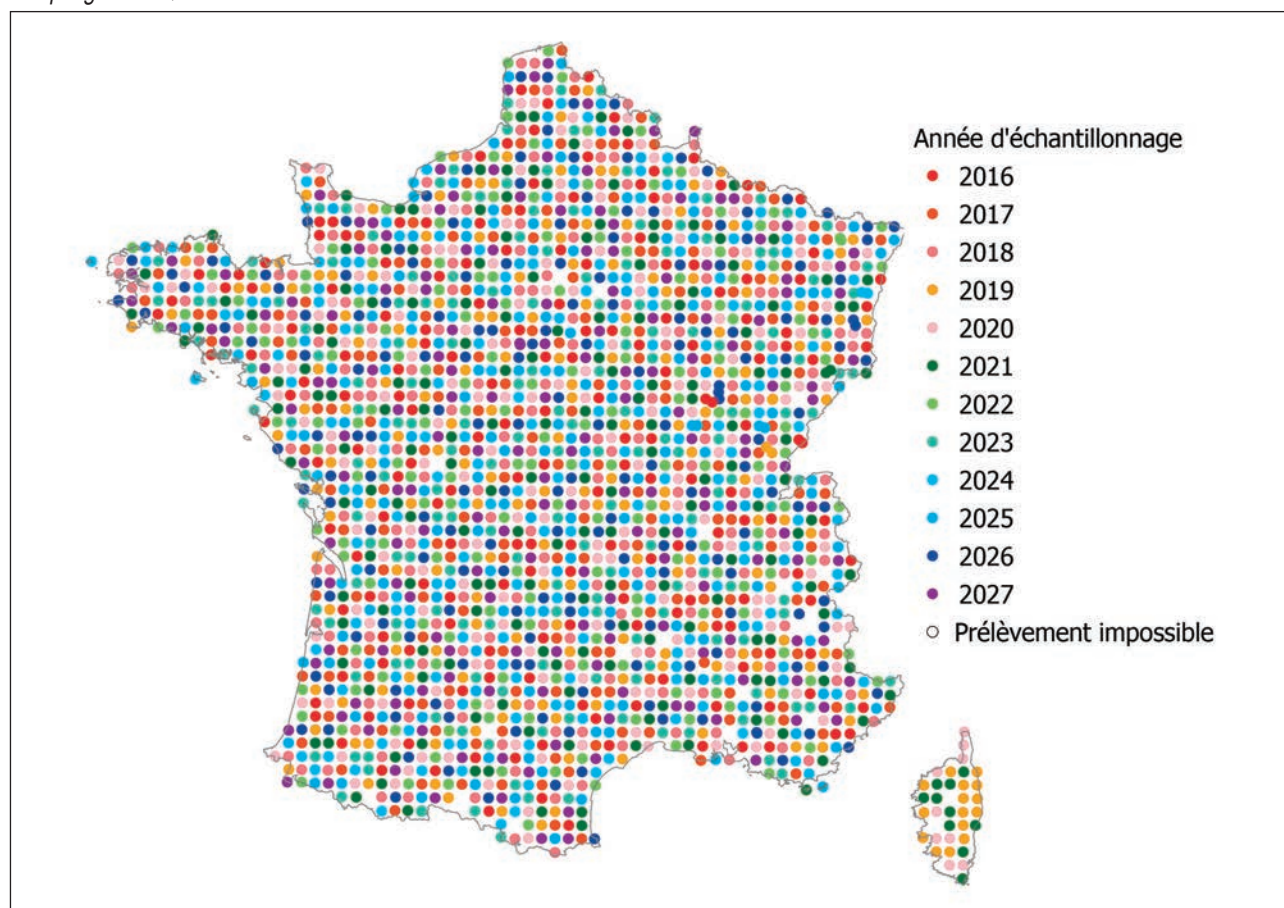
campagne (RMQS2) ont démarré avant même la fin de la première afin de définir les paramètres à mesurer et les budgets nécessaires. La stratégie d'échantillonnage a également été révisée pour être en mesure de détecter rapidement des évolutions relatives à l'ensemble du territoire et pour disposer annuellement 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 particulaires, 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.

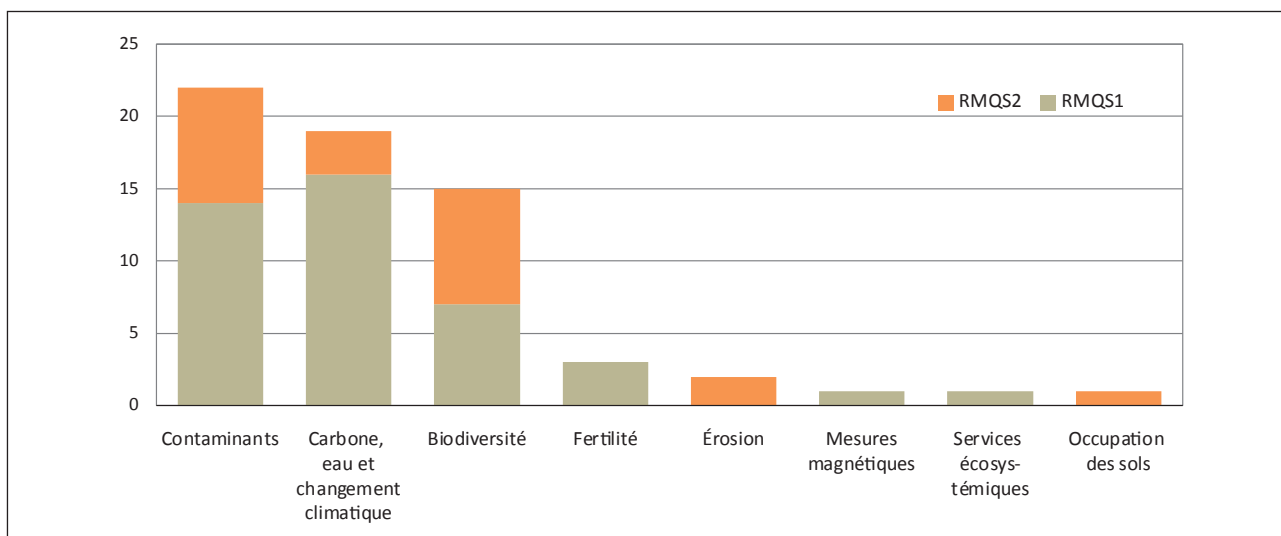
Les avancées permises grâce aux données collectées par le RMQS démontrent sans ambiguïté que ce réseau est un outil de référence incontournable pour évaluer l'état des sols à l'échelle de la France. Dès son lancement, le panel de mesures réalisées sur le RMQS avait vocation à répondre aux enjeux et de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

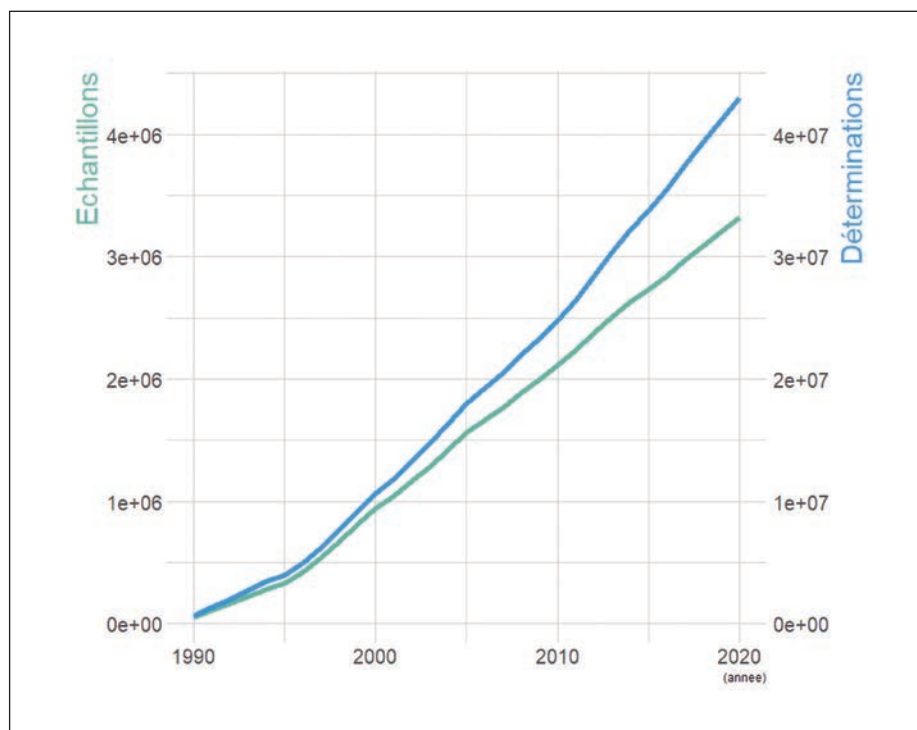
Comme le montre la *figure 9*, l'intégration du programme BDAT aux actions du GIS dans les années 2000 a permis d'accélérer la collecte de données stockées dans la base, tant en nombre d'échantillons qu'en richesse de l'information capitalisée. Cette base comporte aujourd'hui plus de 3,26 millions de 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 ABCTerre 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 ($\text{HF} + \text{HClO}_4$) 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)

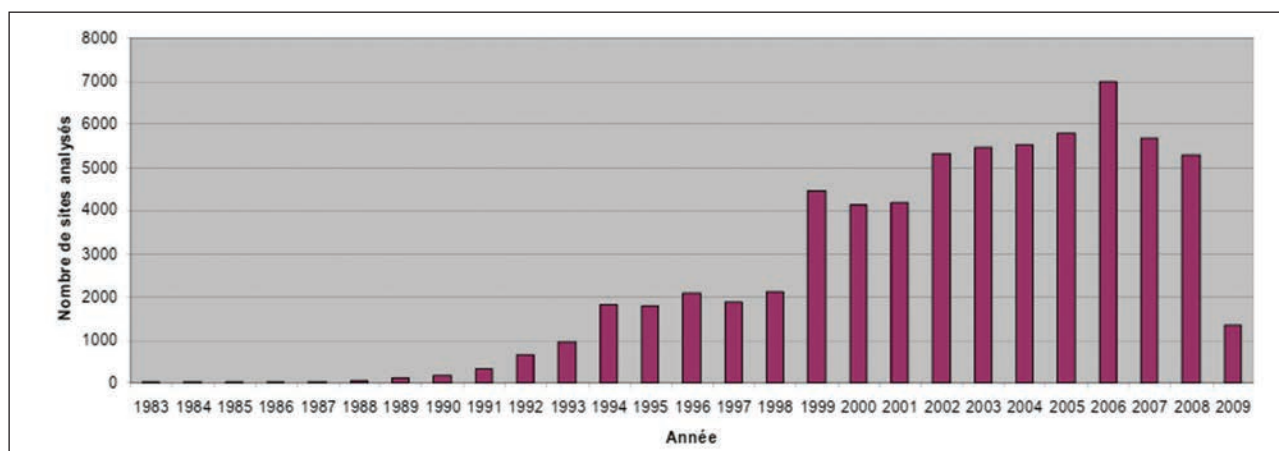
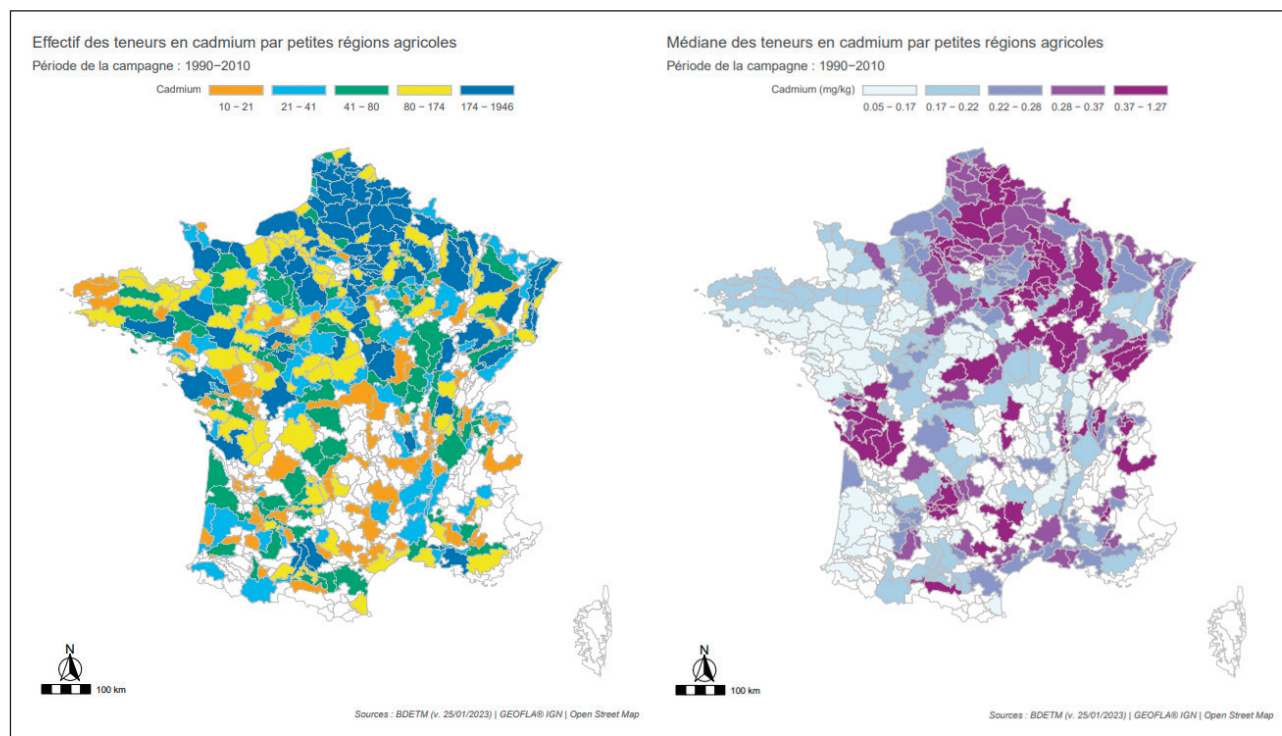


Figure 11. Résultat de la BDETM pour les 2 périodes de collecte : a) Nombre de site d'analyses de la BDETM par département ; b) Médianes des teneurs en cadmium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) par région agricole (extractions ER et HF + HClO_4 considérées)
(NB : les zones en blanc sur la carte correspondent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

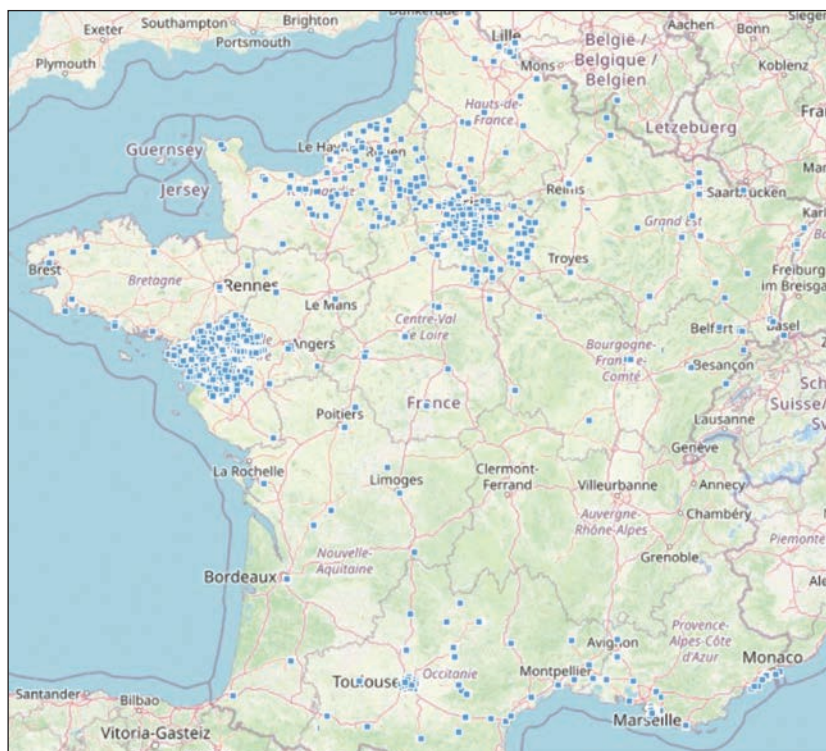
BDSolU permet la bancarisation d'un nombre important de données descriptives des sols, recueillies dans des conditions et selon des protocoles variés. Cette base contient les métadonnées relatives au lieu de prélèvement, au sondage, aux matériaux rencontrés, à l'échantillonnage, à l'échantillon, aux 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.

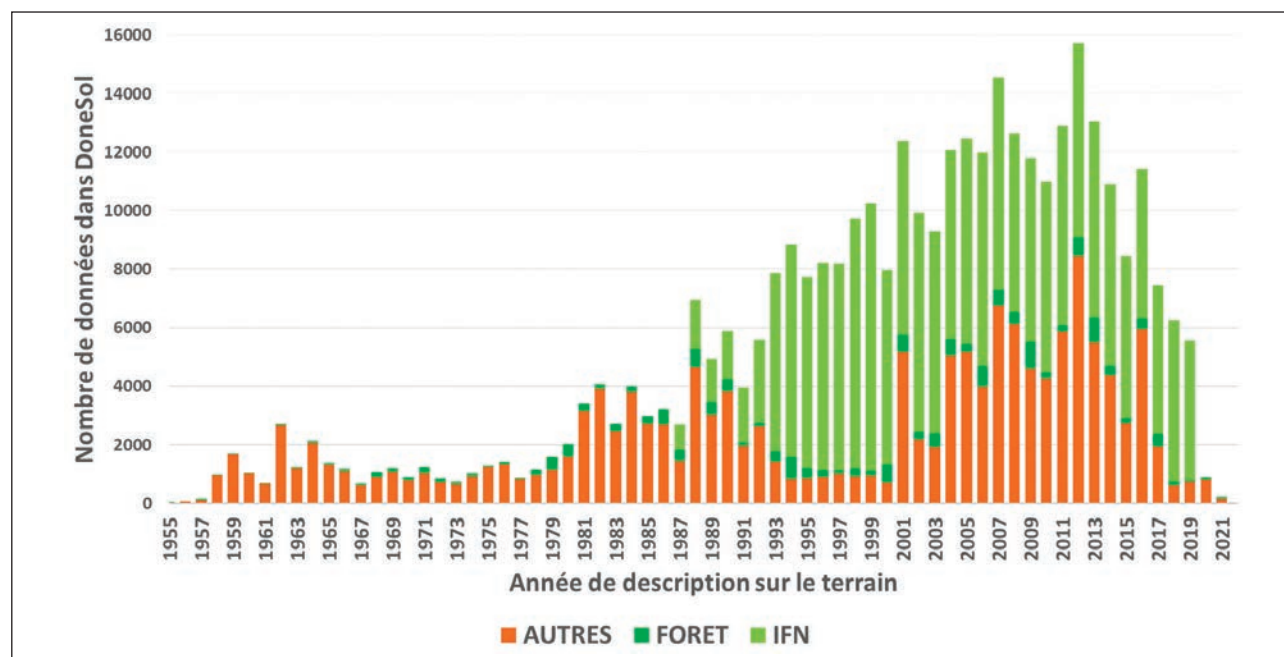
7.LE PROGRAMME IGN SUR LES SOLS FORESTIERS

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 (Lacarc *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 ultra-marins 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 régit 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 (Répedo, <https://annuaire.gissol.fr/repedo>) ou d'applications thématiques réalisées à partir des bases de données cartographiques sur les sols (Appicasol, (Giroit *et al.*, 2017), <https://annuaire.gissol.fr/appicasol>)

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-Odoux *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://bibliothèque.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-Odoux C., (2022). Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années. *Étude et Gestion des Sols*, 29, 365-379.
- 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 A., 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>
- Citeau 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'Energie. <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., Commagnc 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., Commagnc 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., Schvartz C., Denoroy P., Villette C., Saby N.P.A., Arrouays D., Lemerrier 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., Vanwindekens 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-Oudoux, C., Renault P., Antoni V., Arrouays D., Bougon N., Denys S., Fiquet J., François Y., Ille 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 phytocécologiques 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 phytocécologiques 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., Jabiou B. (2005). Ecopant: 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>
- Giriot, G., Millet F., Schnebel N., Cousin I., Toutain B., Bardy M. (2017). Appicasol, 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/QSXXGA>
- 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., Schnebel 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., Lattalais C., Le Martret H., Lehmann S., Pickel A., Richer-De-Forges A.C., Saby N.P.A., Schellenberger A., Taffoureaux 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., Auroousseau P., Roudaut A. (1988). Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre. *Science du Sol*, 26 (1): 29-40.
- Lemerrier B., Gaudin, L., Walter, C., Auroousseau, 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.
- Lemerrier 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.
- Lemerrier 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 Abstracts*, 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., Lemerrier, 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., Lefeuvre 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.
- Oriagazzi 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-0SgqxuduyfZ8M0jSkknUX_OW8Mx9RQWmjoFZAnDXuQ
- Ranjard L., Sauter J., Auclerc A., Chauvin C., Cluzeau D., Mereau D., Loiseau-Dubosc P., Lemerrier 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., Lemerrier 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., Verbèke B., Desbordes 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., Lemerrier 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., Lemerrier, B., Follain, S., Walter, C., Schwartz, C., 2008. Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990-2004. *Soil Use and Management* 24, 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., Squivindant 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., Binéy 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., Schnebel 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., Schnebel N. (2020). Possible futures of soil mapping in France. *Geoderma Regional*, 23, e00334.
- Walter C., Bouédo 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., Bouédo T., Arousseau P. (1997). Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 : II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. *Étude et Gestion des Sols*, 4 (3), 205-219.

Les données du GIS Sol pour appuyer les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique

Barrières et stratégies de valorisation

M. P. Martin^(1*), A. Duparque⁽²⁾, A. Bispo⁽¹⁾, N. P.A. Saby⁽¹⁾ et B. Guenet⁽³⁾

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

2) Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2 chaussée Brunehaut 80200 Estrées-Mons, France

3) Laboratoire de géologie de l'ENS, UMR 8538 CNRS-ENS, IPSL, Université PSL, 75005 Paris, France

* Auteur correspondant : manuel.martin@inrae.fr

RÉSUMÉ

Les sols jouent un rôle prépondérant en matière d'atténuation du changement climatique et d'adaptation des secteurs agricoles et forestiers. L'élaboration de politiques publiques qui viseraient à réduire nos émissions de gaz à effet de serre, à augmenter la fonction de puits des sols vis-à-vis du dioxyde de carbone atmosphérique, et à renforcer nos capacités d'adaptation, notamment en matière d'agriculture ou de sylviculture, repose sur la connaissance et l'existence de données concernant nos sols et leur gestion. Le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (le GIS Sol) pilote quatre grands programmes d'acquisition de la donnée sol, et est responsable de sa gestion, de son traitement et de sa diffusion. Les données du GIS Sol ont été, depuis plusieurs décennies, au cœur d'études mandatées par les pouvoirs publics et de travaux de recherche visant à mieux comprendre et gérer les sols, pour l'atténuation du changement climatique ou pour adapter l'agriculture et la forêt aux perturbations annoncées. Ces données permettent de mieux comprendre et caractériser les rôles passé, présent et futur des sols en lien avec le changement climatique. Le potentiel des données du GIS Sol est toutefois sous-exploité, pour différentes raisons, et notamment la complexité de la donnée sol et son accessibilité. Il semble raisonnable de préconiser un renforcement des efforts pour la faire mieux connaître, notamment auprès des communautés scientifiques qui travaillent sur le changement climatique, par exemple en ciblant certains portails nationaux et internationaux de diffusion de la donnée. Il conviendra également d'améliorer son accessibilité, notamment en clarifiant les aspects juridiques s'y rapportant, et son inter-opérabilité. Ce sont là des conditions pour la réalisation

Comment citer cet article :

Martin M. P., Duparque A., Bispo A., Saby N. P.A. et Guenet B., 2024 - Les données du GIS Sol pour appuyer les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique : barrières et stratégies de valorisation *Étude et Gestion des Sols*, 31, 91-102

du plein potentiel des programmes du GIS, des programmes en évolution permanente, en matière de recherche et d'appui aux politiques pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

Mots-clés

Changement climatique, atténuation, adaptation, gaz à effet de serre, données sol, GIS Sol, COS, CO₂, N₂O, CH₄, agriculture, sylviculture.

SUMMARY

GIS SOL SOIL DATA AS A SUPPORT FOR CLIMATE CHANGE ADAPTATION AND MITIGATION POLICIES:

Barriers and promises

Soils play a key role in climate change mitigation and for the adaptation of the agricultural and forestry sectors. The development of public policies aimed at reducing our greenhouse gas emissions, at increasing the sink function of the soils with respect to atmospheric carbon dioxide, and strengthening our capacities of adaptation, particularly in terms of agriculture or forestry, is primarily based on knowledge of our soils and their management. The Soil Scientific Interest Group (Sol GIS) runs four major soil data acquisition programs and is responsible for their data management, processing and dissemination. Data from the GIS Sol have been, for several decades, at the heart of studies commissioned by the public authorities and research work aimed at better understanding and managing soils, for the mitigation of climate change or to adapt agriculture and the forest to it. These data make it possible to better understand and characterize the past, present and future role of soils in relation to climate change. The potential of the GIS Soil data is however under-exploited, for various reasons, and in particular the complexity of the soil data and its accessibility. We may reasonably recommend a strengthening of efforts to make it better known, particularly among the scientific communities working on climate change, for example by targeting certain national and international data dissemination portals. It will also be necessary to improve its accessibility, in particular by clarifying the related legal aspects, and its interoperability. These are the conditions for realizing the full potential of the ever-evolving GIS programs in research and policy support for climate change mitigation and adaptation.

Key-words

Climate Change, mitigation, adaptation, greenhouse gas, soil data, GIS Sol, COS, CO₂, N₂O, CH₄, agriculture, forestry

RESUMEN

LOS DATOS DEL GIS SOL PARA APOYAR LAS POLÍTICAS DE ATENUACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO:

Barreras y estrategias de valorización

Los suelos desempeñan un papel importante en la atenuación del cambio climático y en la adaptación de los sectores agrícola y forestal. La elaboración de políticas públicas que tengan por objeto reducir nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar la función de sumidero de los suelos frente al dióxido de carbono atmosférico y reforzar nuestra capacidad de adaptación, especialmente en materia de agricultura o silvicultura se basa en el conocimiento y la existencia de datos sobre nuestros suelos y su gestión. El Grupo de Interés Científico Suelo (GIS Sol) dirige cuatro grandes programas de adquisición de datos de suelo y es responsable de su gestión, tratamiento y difusión. Los datos del GIS Sol han sido, durante varias décadas, el centro de estudios encargados por las autoridades públicas y de trabajos de investigación para comprender mejor y gestionar los suelos, para la atenuación del cambio climático o para adaptar la agricultura y los bosques a las perturbaciones anunciadas. Estos datos permiten comprender y caracterizar mejor el papel pasado, presente y futuro de los suelos en relación con el cambio climático. Sin embargo, el potencial de los datos del GIS Sol no se aprovecha plenamente por diversas razones, entre ellas la complejidad de los datos de suelo y su accesibilidad. Parece razonable promover un fortalecimiento de los esfuerzos para dar a conocer esta cuestión, en particular entre las comunidades científicas que se ocupan del cambio climático, por ejemplo, centrándose en determinados portales nacionales e internacionales de difusión de datos. Asimismo, deberá mejorarse su accesibilidad, en particular mediante la aclaración de los aspectos jurídicos y su interoperabilidad. Estas son las condiciones para la realización del pleno potencial de los programas del GIS, de los programas en continua evolución, en materia de investigación y de apoyo a las políticas para la atenuación y la adaptación al cambio climático.

Palabras clave

Cambio climático, atenuación, adaptación, Gases de efecto invernadero, datos suelo, GIS Sol, COS, CO₂, N₂O, CH₄, agricultura, silvicultura

1. INTRODUCTION

L'urgence climatique nécessite de réduire drastiquement nos émissions de gaz à effets de serre, pour atténuer le changement climatique et, dans un même temps, de développer des stratégies d'adaptation à ce changement. En matière d'atténuation, pour rester en accord avec les objectifs de la COP21 et sous la barre des 2 degrés de réchauffement en comparaison avec la période préindustrielle, il sera aussi nécessaire de mettre en place des technologies dites « d'émissions négatives », c'est-à-dire des technologies séquestrant plus de carbone qu'elles n'en émettent (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). L'utilisation des capacités naturelles des sols à stocker des quantités importantes de carbone sur des temps longs semble être une technologie d'émissions négatives intéressante (Arrouays *et al.*, 2002), parmi d'autres, mais qui nécessite des modifications des pratiques de gestion des sols (Rodrigues *et al.*, 2021). Augmenter l'apport de carbone dans les sols par les plantes en modifiant la gestion des terres semble être la meilleure approche pour y parvenir (Pellerin *et al.*, 2021). Cela ne s'applique toutefois qu'aux terres déjà gérées par l'homme, comme les terres cultivées ou certaines prairies et forêts (Minasny *et al.*, 2017). L'augmentation des retours au sol de biomasse végétale implique soit une modification des allocations de cette biomasse (par exemple la gestion des résidus) soit une augmentation de la production végétale, qui, elle, dépend d'un ensemble de facteurs (comme par exemple la disponibilité des nutriments, de l'eau dans les sols). Les pratiques agricoles nécessaires à l'augmentation de ces biomasses peuvent également générer des émissions de GES additionnelles dont l'effet sur le changement climatique est directement opposé à celui du stockage de carbone dans le sol (Guenet *et al.*, 2021). Le potentiel d'atténuation du changement climatique par le stockage du carbone dans le sol fait partie du portfolio d'un ensemble de solutions à travailler. Il s'intègre, à certains égards, dans la bio-économie, pour laquelle les sols jouent un rôle central en tant que support de la croissance végétale, et qui est amenée à jouer un rôle crucial pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique (Ecuru *et al.*, 2022). Les sols constituent en effet également un allié incontournable en matière d'adaptation au changement climatique. Leurs propriétés (ex : réservoir d'eau, fertilité biologique) conditionnent leur capacité à maintenir leurs fonctions et services écosystémiques (ADEME and I-CARE & Consult, 2016) et, par voie de conséquence, la durabilité des systèmes agricoles et forestiers dans un contexte de changement climatique.

Bien connaître les sols, et la façon dont leurs propriétés varient dans le temps et l'espace, est donc primordial pour alimenter et accompagner les actions visant l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Nous avons besoin de données, par exemple, pour suivre l'évolution des niveaux de carbone organique dans les sols (COS), pour comprendre les déterminants des émissions de GES par les sols et réaliser

des projections. Cela s'applique plus largement aux services écosystémiques des sols générés, en lien avec la gestion des sols et dans un contexte de changement climatique. Les programmes du GIS Sol, dont les plus connus sont la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF, INRA, 2018), l'Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS, Laroche, 2013), le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS, Jolivet *et al.*, 2006) et la Base de Données d'Analyses des Terres (BDAT, Saby *et al.*, 2014), fournissent pour cela différents types de données. Ils contribuent ainsi à la connaissance des sols français et servent de socle aux politiques publiques dans le cadre de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique, depuis l'échelle nationale (avec l'emblématique étude française 4 pour mille, Pellerin *et al.*, 2021) jusqu'à des échelles locales (avec par exemple la mise en place d'outils d'aide à la décision à destination des aménageurs, tels qu'ALDO ou Climagri, ADEME 2018, 2020).

Nous dressons ici tout d'abord un bilan de la façon dont ces données alimentent, à différents niveaux, les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Nous expliquerons ensuite en quoi, d'après nous, ces données sont sous-exploitées et, enfin, nous présenterons quelques perspectives d'enrichissement et d'utilisation des données dans ce contexte.

2. RICHESSE DES DONNÉES ET APPLICATIONS

Les données du GIS sol ont déjà été largement utilisées pour la recherche, en amont de la construction des politiques publiques mais aussi dans des études mandatées directement par les ministères et les agences. S'agissant des émissions de gaz à effet de serre, et donc des politiques d'atténuation, les données sol sont mobilisables suivant différentes modalités. La première, et peut-être la plus connue, repose sur la connaissance des dynamiques spatio-temporelles du carbone organique des sols (COS). Les variations de COS représentent en effet l'intégration, sur le moyen-long terme, des émissions (que l'on considère par convention négatives lorsque le sol joue le rôle d'un puits, et positives lorsqu'il est source) de CO₂ et, dans certains cas, du CH₄. Les émissions du troisième GES majeur, le protoxyde d'azote, ne peuvent pas être déduites directement de l'observation des variations d'une propriété du sol (par exemple l'azote total). Il est alors nécessaire d'avoir recours à des modèles sol ou sol/plante, qui nécessitent, entre autres, des données sol (par exemple la texture, le pH). C'est là la seconde modalité d'utilisation des données sol pour l'atténuation du changement climatique. Nous verrons que cette seconde modalité, comme variables alimentant les modèles, s'applique également au cas de l'adaptation. Nous donnons dans la suite du paragraphe des exemples de ces différentes modalités d'utilisation des données

sol dans le cadre de l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

2.1 Données sur le carbone Organique des sols

L'une des applications directes des données du GIS porte sur l'état, le suivi et la cartographie des variations spatiales et temporelles du COS, avec deux programmes phares sur cette thématique, que sont le RMQS (Martin *et al.*, 2022) et la BDAT (Saby *et al.*, 2014). La dimension spatiale est un point d'entrée extrêmement important. Comprendre les distributions actuelles spatiales du COS permet en effet de confirmer des résultats expérimentaux concernant les facteurs qui conditionnent la dynamique du COS (e.g. l'effet des précipitations, Martin *et al.*, 2011), et de mieux caractériser leurs effets et leurs interactions dans la diversité des systèmes sol-plante, conditionnés notamment par le climat et l'usage des sols. Des jeux de données tels que ceux issus du RMQS, sont par ailleurs utilisés pour produire des niveaux de référence des stocks de COS, par type d'occupation et par découpage administratif, qui sont directement utilisés par le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) pour réaliser ses inventaires nationaux d'émission de GES (CITEPA, 2022). Le programme de la BDAT, quant à lui, porte exclusivement sur les sols agricoles et, parmi les produits disponibles, propose des statistiques sur les teneurs en COS, pour différentes entités spatiales de restitution (canton, département, régions agricoles, etc.), mises à disposition sur internet (voir par exemple <http://bdatt.gissol.fr>). Les références produites par ces deux programmes sont directement mobilisables dans le cadre de politiques d'aménagement du territoire : il est par exemple possible de proposer, par zone climatique et grand type de sol, des valeurs cibles de stock de carbone à atteindre en fonction de l'usage des sols (Chen *et al.*, 2019) ou bien de localiser les zones à protéger car présentant des stocks importants ou au contraire présentant des stocks les plus faibles sur lesquelles des changements de pratique sont prioritaires pour améliorer l'état des sols (Martin *et al.*, 2021). Les données du RMQS ont d'ailleurs été mobilisées pour la mise en place d'outils d'aide à la décision, certains étant directement à destination des aménageurs et des gestionnaires des sols (Martin *et al.*, 2022). Ajoutons que malgré les possibles biais statistiques liés au mode de collecte des analyses dont les résultats peuplent la BDAT, ce programme est le seul offrant à date, à l'échelle nationale, un recul temporel de 30 ans concernant les teneurs en COS dans les sols agricoles français.

Ces observations de variations des teneurs ou des stocks de COS sont primordiales pour améliorer notre compréhension de la dynamique du COS, notamment en lien avec les pratiques agricoles en terres cultivées (Curien *et al.*, 2021 ; Sleutel *et al.*, 2007). Elles permettent également de mieux spécifier les conditions aux limites des modèles utilisés pour orienter les

politiques publiques (Pellerin *et al.*, 2021). À moyen terme, le RMQS fournira des références d'évolution des stocks de carbone, pour la période 2000-2030, de façon plus contrôlée que dans le cas de la BDAT, du fait de la maîtrise du plan d'échantillonnage. Ces valeurs de référence pourront être directement mobilisées pour évaluer l'effet des politiques publiques en matière d'atténuation du changement climatique.

La puissance des programmes du GIS Sol réside également dans leur étroite connexion avec d'autres programmes de recherche qui, à terme, produiront des résultats sur lesquels les politiques pourront s'appuyer. Les travaux sur la qualité de la matière organique en sont un bon exemple. L'évolution du COS dans le sol est déterminée non seulement par les processus de minéralisation et les entrées de matière organique dans les sols, mais aussi par l'état du stock de COS lui-même, qu'il s'agisse de la quantité de COS, mais aussi de sa qualité. La qualité de la matière organique des sols, composée d'une grande variété de molécules, conditionne sa récalcitrance à la minéralisation, donc en partie sa persistance dans les sols (Schmidt *et al.*, 2011), et par conséquent l'évolution des stocks de COS. Ainsi, le stock de COS d'une prairie, composé d'une proportion élevée de matière organique particulaire (MOP)¹, baisse brutalement si les entrées de MO dans le sol diminuent, comme par exemple dans le cas où la prairie est retournée, du fait du caractère labile des MOP. La nature des stocks de COS est un élément que les politiques publiques devront à l'avenir mieux intégrer (Martin *et al.*, 2021). Plusieurs programmes de recherche en cours sur les données RMQS traitent de cet aspect en mobilisant par exemple des techniques spécifiques de pyrolyse (Cécillon *et al.*, 2018 ; Delahaie, 2023 ; Kanari *et al.*, 2022) et de fractionnement densimétrique (von Lützow *et al.*, 2007 ; Poeplau *et al.*, 2018). Ces informations sur la stabilité du carbone sont particulièrement importantes lors de l'utilisation de modèles.

2.2 Utilisation des données GIS Sol comme support de la modélisation

Les modèles sont indispensables dès lors qu'il s'agit d'estimer des variables non aisément mesurables, notamment aux échelles régionales et nationales, de réaliser des projections, ou encore de tester des hypothèses. De nombreux modèles représentant le système sol ou le système sol/plante sont mobilisés pour les questions d'atténuation ou d'adaptation. Il s'agit notamment d'estimer des émissions de gaz à effet de

¹ MOP : Matières Organiques Particulaires : fraction des matières organiques du sol déjà évoluées, mais non encore intimement associées à la matrice minérale du sol et de ce fait peu protégées – contrairement aux fractions de matières organiques plus fines de l'humus, elles sont donc facilement minéralisées si les conditions pédoclimatiques sont favorables. La proportion de ces MOP dans le sol peut être déterminée par fractionnement granulométrique des MOS.

serre tels que le N_2O ou le CH_4 (Hénault *et al.*, 2019; Petrescu *et al.*, 2021), les variations de stock de COS dans les sols ou encore la croissance végétale (Pellerin *et al.*, 2021). Nous détaillons ci-dessous dans quelle mesure les modèles utilisés pour ces deux dernières questions peuvent mettre à profit les données du GIS Sol.

2.2.1 Modèles sol de la dynamique du COS

Les modèles numériques sont devenus un outil indispensable à notre compréhension des sols mais également un outil décisionnel majeur en matière de stockage de COS et d'émission des GES en lien avec la gestion du sol. En effet, utilisés correctement, ces modèles peuvent fournir des informations précieuses sur les conséquences de la mise en place de telle ou telle pratique de gestion, ou encore sur l'impact de l'évolution de l'usage des terres.

Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne la dynamique du carbone des sols. La mise en équations de la dynamique du COS n'est pas nouvelle et date des travaux d'Henin et Dupuis en 1945. Depuis, de nombreuses approches ont été développées considérant désormais des approches multi-modèles (Bruni *et al.*, 2022; Farina *et al.*, 2017; Riggers *et al.*, 2019). Néanmoins tous ces modèles possèdent un certain nombre de conditions aux limites, c'est à dire des caractéristiques non calculées par le modèle mais nécessaires au calcul des changements d'état du système (par exemple les variations du COS). Un exemple classique est la texture du sol qui va affecter la dynamique du COS dans la plupart des modèles connus mais qui n'est ni calculée ni prédite directement par le modèle. Cela s'applique donc aux modèles de dynamique du COS (voir par exemple Martin *et al.*, 2022 pour l'utilisation du taux d'argile, issu des données *GlobalSoilMap* produites par le GIS Sol, en données d'entrée) mais aussi pour des modèles d'émission d'autres GES (Hénault *et al.*, 2019, pour le N_2O et l'utilisation de données de pH tirées du RMQS). L'une des autres conditions aux limites indispensable en matière de modélisation de la dynamique du COS est le stock initial, à partir duquel on calcule les évolutions. Dans un contexte de simulation spatialisée, il faut donc disposer de cartes du COS. Ainsi, l'étude française 4p1000 (Pellerin *et al.*, 2021) a récemment utilisé une carte du COS produite par le GIS Sol (Mulder *et al.*, 2016) à 90 m de résolution, et agrégée à 1 km de résolution. Cette carte a également été intégrée, depuis, à l'exercice international conduit sous l'égide de la FAO visant à spatialiser les stocks de carbone dans les sols à l'échelle mondiale (GSOC map, <http://54.229.242.119/GSOCmap/>).

La méthode ABC'Terre² donne un autre exemple de valorisation des données de deux des principales bases de données du GIS Sol. Composée de cinq modules de calculs (figure 1), elle associe des étapes de traitements de données qui permettent d'alimenter la réalisation du bilan de carbone organique des sols et du bilan de GES. Ces bilans portent sur des maillons élémentaires d'un territoire agricole de grandes

cultures et incluent des cartes des variations de stocks de carbone du sol et des émissions de GES, pour l'ensemble du territoire considéré. Cette méthode est principalement déployée dans le cadre des plans d'actions des PCAET (Plan Climat Air Energie Territorial) des collectivités locales.

Les données du GIS Sol mobilisées alimentent :

- des algorithmes intégrés à l'outil RPG-Explorer³, pour affecter les rotations culturales reconstituées par cet outil à partir des données des RPG, aux types de sol correspondant aux UTS (Unités Typologiques de Sols) des Référentiels Régionaux Pédologiques (programme IGCS, géré par le GIS Sol) associés aux territoires diagnostiqués (étape 1 de la méthode ABC'Terre). Cette affectation se fait via une matrice intégrant les paramètres des sols, tels que la texture, la profondeur, la teneur en cailloux, la teneur en $CaCO_3$, la présence d'hydromorphie, qui déterminent leur potentiel agronomique de production et leur aptitude ou non à recevoir une culture donnée.
- les algorithmes constitutifs de la méthode d'affectation de teneurs en Carbone organique issues de la BDAT aux types de sols (UTS) des Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) et qui croisent des critères spatiaux et pédologiques (Scheurer *et al.*, 2020) (étape 2 d'ABC'Terre).
- le modèle AMG (Clivot *et al.*, 2019) mis en œuvre par l'outil Simeos-AMG⁴, qui attend en entrée, les teneurs du sol en Carbone organique, en argile, en $CaCO_3$, en cailloux, son pH et le C/N des MOS.

La sensibilité des modèles aux conditions limites est très importante et l'utilisation de données de qualité pour contraindre le modèle est une condition indispensable pour obtenir des prédictions exploitables. Le rôle des données du GIS Sol est donc ici majeur.

Les données du COS sont également essentielles, à l'autre bout de la chaîne de modélisation, pour l'évaluation des capacités des modèles à reproduire des observations. En

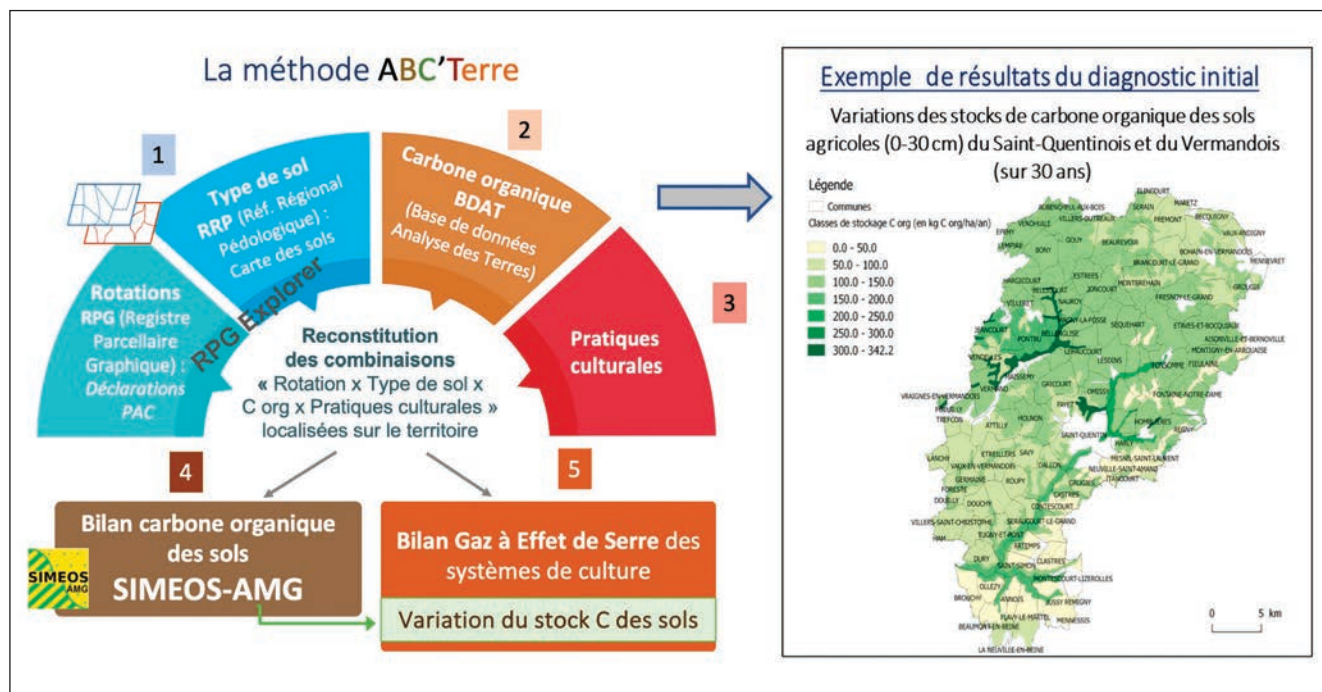
2 ABC'Terre : Atténuation du Bilan de gaz à effet de serre intégrant le Carbone des sols. Méthode et démarche de diagnostic territorial, développées par AgroTransfert-Ressources et Territoires et ses partenaires, dans le cadre de projets financés par l'ADEME entre 2012 et 2020, qui permet d'évaluer le potentiel d'atténuation lié aux systèmes de culture à l'échelle d'un territoire, en tenant compte des caractéristiques du sol et des pratiques des agriculteurs. <https://abcterre.org>

3 RPG-Explorer : Outil de reconstitution de séquences et de rotation des cultures, et, dans le cadre d'ABC'Terre, intégrant l'affectation de ces rotations à des types de Sols (UTS des Référentiels Régionaux Pédologiques). Il est alimenté par les Registres Parcellaires Graphiques issus des déclarations PAC des agriculteurs et pour ce module particulier, par les données des RRP ; il a été développé par AgroPariTech. <https://tice.agroparitech.fr/coursenligne/courses/RPGEXPLORER/>

4 Outil de Simulation d'évolution de l'Etat Organique des Sols en fonction des pédoclimats locaux et des systèmes de culture, intégrant le modèle AMG de l'INRAe de Laon. <http://www.simeos-amg.org/>

Figure 1 : Valorisation de données du GIS Sol par la méthode ABC'Terre : Cinq étapes de calcul, faisant appel aux données des Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP, Etape 1) et à celles de la BDAT (Etape 2), pour générer des diagnostics spatialisés du stockage de C organique dans les sols (exemple pour le Saint-Quentinois-Vermandois, dans l'Aisne) et des émissions de GES, liées aux productions agricoles en grandes cultures.

Figure 1: Using the GIS Sol data within the ABC'Terre method: five calculation steps, using RRP data (Step 1) and BDAT data (Step 2), to generate spatial diagnostics of the storage of Organic C in the soil (example for Saint-Quentinois-Vermandois, in Aisne) and GHG emissions, linked to agricultural production in field crops.



effet, un modèle peut être très performant dans un contexte donné mais beaucoup moins dans d'autres conditions (Mao *et al.*, 2019). Avoir les capacités à évaluer un modèle dans un contexte le plus proche possible de celui dans lequel il est utilisé est indispensable, notamment si la finalité est d'élaborer des politiques publiques.

2.2.2 Modéliser la croissance végétale en lien avec l'adaptation et l'atténuation

L'une des fonctions majeures des sols est d'être le support de la croissance végétale. Or, être en mesure d'évaluer comment la croissance végétale est susceptible de changer dans un contexte de changement climatique est indispensable à plusieurs titres. Cela permet par exemple d'évaluer la résilience des systèmes agricoles et forestiers et donc les possibilités d'adaptation. Cela constitue également une entrée importante pour les aspects d'atténuation, d'une part en lien avec la bioéconomie (Ecuru *et al.*, 2022; Juerges et Hansjürgens, 2018), d'autre part en lien avec les variations attendues des apports de biomasse végétale au sol, ces apports de biomasse étant l'un des premiers facteurs de variation des stocks de COS.

En l'absence de données observées et observables, les modèles de croissance végétale, comme par exemple les modèles de culture, sont utilisés pour simuler, en conditions changeantes, la croissance végétale. Ces modèles requièrent le plus souvent l'utilisation de données pédologiques détaillées pour fonctionner. C'est le cas en particulier du modèle STICS bien connu en France (voir par exemple Launay *et al.*, 2021, avec l'utilisation des données de la BDGSF), du modèle américain Century (Parton *et al.* 1987) ou encore du modèle danois Daisy (Svendsen *et al.*, 1995). Ils utilisent des paramètres sols (teneur en argile, en MO, en CaCO_3 , en éléments grossiers, profondeur du sol) qui permettent notamment d'estimer le Réservoir Utile (RU) d'eau du sol et certaines propriétés physiques présidant à la croissance du système racinaire. Certains outils, destinés à des usages de Recherche-Développement utilisent ces mêmes données sol pour estimer des potentiels de rendement sur des territoires régionaux. Ce sont par exemple les données que l'on retrouve dans la matrice agronomique de l'outil RPG-Explorer lorsqu'il est utilisé pour l'affectation de séquences de cultures aux UTS dans la méthode ABC'Terre (teneurs en argile, calcaire et cailloux, Réservoir utilisable maximal, excès d'eau). L'outil

PERSYST développé par INRAE Agronomie Grignon (Guichard *et al.*, 2013) a ainsi été paramétré dans plusieurs régions pour les principales cultures qui s'y rencontrent en combinant une typologie des sols et des zones climatiques régionales et la récolte d'informations statistiques et à dire d'experts sur les rendements agricoles observés. Disposant de la combinaison de ces approches, des porteurs de projets souhaitant valoriser de la biomasse agricole peuvent estimer les productions locales et les flux potentiels de matières à destination d'unités de valorisation à implanter au sein des territoires.

La prise en compte des liens entre sol et croissance végétale pour des outils d'aide à la décision dépasse les enjeux purement liés au changement climatique. Citons toutefois quelques exemples d'utilisation des données sol produites par le GIS Sol dans le cadre d'outils de conseil agro-environnemental. Le premier exemple est celui de l'outil AqYield, intégré à la plateforme Maelia⁵, qui aide à la gestion de l'eau à l'échelle de territoires dans le Sud-ouest de la France. Cet outil utilise des données cartographiées de teneur en argile et de profondeur de sol. Par ailleurs, à l'initiative du RMT Sols et Territoires, le projet TYPTERRRES (Laroche *et al.*, 2020) vise à construire à partir des RRP des typologies agronomiques des sols partagées, à des fins de diagnostic, d'évaluation, de conseil et d'actions agronomiques et agro-environnementales. Les très nombreuses UTS décrites au sein des UCS qui composent un RRP sont ainsi synthétisées en un nombre plus restreint d'unités typologiques. Les données pédologiques pures sont complétées par des paramètres agronomiques disponibles localement, qui rendent plus directement utilisables les bases de données sol géographiques ainsi constituées, pour des applications agricoles, tout en valorisant des informations disponibles sur les sols en régions.

3. SOUS-EXPLOITATION DE CETTE RICHESSE

Si les applications des données GIS Sol, en amont et dans le cadre des politiques d'atténuation et d'adaptation, sont multiples, force est de constater que ces données restent encore sous-exploitées, notamment dans le domaine du climat. Ces données sont connues par la communauté travaillant directement avec le GIS Sol mais semblent assez peu connues d'un certain nombre d'utilisateurs potentiels pour qui les sols sont importants. Par exemple, nos collègues climatologues, pour qui les sols jouent un rôle majeur, ont besoin d'information de qualité pour nourrir

leurs modèles mais n'utilisent que très peu les données du GIS Sol. Ainsi, les simulations réalisées avec le modèle ORCHIDEE, à l'échelle nationale, ne reposent sur aucune donnée sol produite actuellement par le GIS Sol (Lafont *et al.*, 2012).

3.1 Verrous scientifiques et techniques

La première raison de cette sous-exploitation réside sans doute dans la technicité de ces données, qui se rapportent à un objet complexe, le sol. La compréhension des données sol susceptibles d'être mobilisées pour la thématique du changement climatique est de fait compliquée par la diversité des supports et échelles décrits par la données sol (depuis l'échantillon de sol jusqu'au canton ou encore à l'unité de sol), faisant référence à des protocoles d'échantillonnages variés (dans le temps et l'espace), des méthodes d'analyse variées et enfin des données contextuelles, souvent extrêmement utiles pour valoriser utilement les données pédologiques (*e.g.* l'occupation du sol) mais elles aussi extrêmement diverses d'un programme à l'autre. Le support spatial de l'information pédologique ne correspond par ailleurs pas toujours aux supports utiles pour l'élaboration de politiques. Par exemple, à un niveau local, l'échelle de la communauté de communes est particulièrement pertinent en matière d'aménagement. Bourdellot (2020) a démontré que la production d'informations pédologique à ces échelles et à partir des produits du GIS sol était possible mais complexe, et parfois limitée par le manque d'informations pertinentes à cette échelle. Dès lors, l'exploitation des données du GIS Sol requiert le plus souvent l'intervention du personnel des instituts travaillant sur ces programmes, et en premier lieu INRAE, ce qui ralentit considérablement les chaînes de valorisation de ces données.

Les bases de données du GIS Sol, et cela n'est pas propre à la thématique traitée dans cet article, sont également complémentaires, et l'exploitation de ces complémentarités est requise pour certaines applications. Comme évoqué précédemment, la méthode ABC'Terre fait appel aux données combinées des Référentiels Régionaux Pédologiques et de la BDAT : les caractéristiques des sols fournies par les UTS identifiées au niveau de chaque UCS d'un Référentiel Régional Pédologique ne comprennent pas d'information récente sur la distribution statistique des teneurs en carbone organiques requises par le calcul des bilans de carbone des sols. Ces informations sont donc recherchées dans la BDAT, qui les contient, issues d'analyses de terre de parcelles agricoles mais localisées à la maille communale sur une grande partie de la France métropolitaine. Une méthode d'affectation spécifique a donc été développée sur quelques territoires pour assurer l'enrichissement de la description des teneurs en COS de surface des couples UCS/UTS en respectant la cohérence agronomique et pédologique des appariements (Scheurer *et al.*, 2020). L'affectation est fondée ainsi sur deux grands critères : un premier critère géographique d'intersection entre la commune

⁵ MAELIA : Modelling of socio-agro-ecological system for landscape integrated assesment ou « Modèle informatique générique pour évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques de modes de gestion des ressources agricoles et naturelles à l'échelle du territoire ». <http://maelia-platform.inra.fr/>

de la parcelle échantillonnée et le contour de l'UCS et un second critère analytique de similitude des teneurs en argile et en calcaire entre l'analyse de terre BDAT et l'UCS intersectée (Figure 2).

Cependant, jusqu'à récemment, tout déploiement de la méthode ABC'Terre sur un territoire agricole requérait l'intervention de l'Unité INRAE InfoSol pour réaliser cette étape de constitution du jeu de données d'entrée des calculs de bilans, car seule cette équipe avait les droits d'accès aux données communales de la BDAT requises pour cette opération, les informations de la BDAT n'étant en effet délivrées publiquement que sous forme de statistiques agrégées à des échelles plus larges comme le canton, en accord avec les laboratoires partenaires.

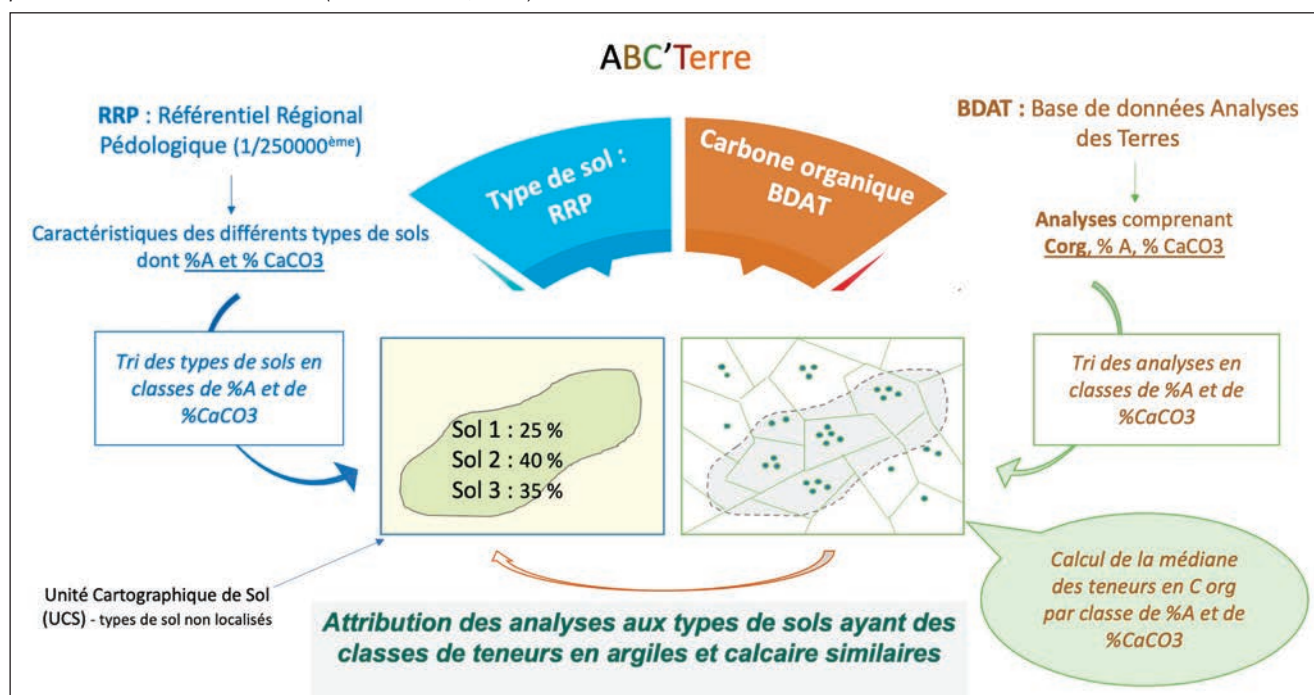
Cette contrainte d'accès aux résultats d'analyses de terre localisée à la communale de la BDAT faisait reposer sur l'équipe Infosol la lourde responsabilité de devoir répondre, dans des délais courts, à toute demande très ciblée associée au déploiement, sur un territoire agricole en France métropolitaine, de la méthode ABC'Terre ou de démarches similaires telles que celle que développe aussi la plateforme Maelia. Cela pouvait donc représenter un frein important à l'utilisation large des données sols mobilisables pour ces diagnostics territoriaux, alors que le contexte de développement des initiatives Bas

Carbone tend à les solliciter de façon croissante. Pour lever ce frein, un travail d'automatisation de la procédure d'affectation a été entrepris par l'unité InfoSol dans le cadre d'un projet IGCS lauréat 2020. Ce projet a permis de proposer une généralisation de la méthode d'affectation Scheurer *et al.* (2020) développée sur un territoire restreint à l'ensemble d'un référentiel pédologique qui couvre un département. Il a également produit des jeux de données prêts à l'emploi décrivant à l'échelle des couples UCS/UTS les distributions statistiques des teneurs en COS pour les référentiels du Grand-Est, du Loiret, de l'Indre, de la Charente-Maritime, de la Vendée, de l'Isère, de l'Oise. D'autres territoires seront progressivement disponibles mais des contraintes persistent sur la disponibilité des données nécessaires et sur les critères d'applicabilité de la méthode (l'algorithme doit être adapté pour les sols non calcaires, comme en Bretagne).

Au-delà de ce travail « à façon » dans le cadre de l'utilisation des données du GIS Sol, reste la problématique d'une mise à disposition plus automatisée de données prêtes à l'emploi. Si des progrès ont été faits sur la mise à disposition de données sur le COS, avec notamment la publication de certains jeux de données sur des entrepôts publics (voir par exemple <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/gissol>), via le site du GIS Sol (www.gissol.fr, mais voir toutefois certaines remarques ci-après concernant le site) ou, pour la BDAT via des applications web

Figure 2 : Affectation de teneurs en C organique issues de la BDAT aux types de sols des RRP, dans le cadre de la méthode ABC'Terre : Schéma de la démarche d'appariement des deux sources de données (Scheurer *et al.*, 2020).

Figure 2: Allocation of organic C contents from the BDAT to RRP soil types, as part of the ABC'Terre method: Diagram of the matching process for the two data sources (Scheurer *et al.*, 2020).



(bdat.gissol.fr), il n'existe actuellement pas d'outils permettant la production d'analyses à façon et qui faciliterait l'utilisation des données sol, pour certaines catégories d'utilisateurs. Il s'agirait par exemple d'outils d'analyse des données en ligne, connectés aux bases de données du GIS Sol, et qui permettraient la visualisation, l'exploration et la production de synthèses par un large public, y compris les pouvoirs publics. Si des solutions techniques existent et ont pour certaines été déjà testées, elles restent à développer et généraliser (ex : <https://traitementinfosol.pages.mia.inra.fr/statistiquesrmqs/>). Elles requièrent cependant des ressources non actuellement disponibles.

3.2 Accéder aux données ?

L'accessibilité des données au plus grand nombre pose d'abord et naturellement des difficultés d'ordre réglementaire notamment sur la propriété et le respect de la vie privée. Outre la combinaison de plusieurs réglementations juridiques, la particularité des programmes du GIS Sol tient à leur composante partenariale forte, où nombreuses sont les données tierces issues du secteur privé. Un équilibre est à trouver entre l'accès, dit « ouvert », promu par les réglementations « open data » et environnementales et les droits des fournisseurs (données à caractère personnel, secret des affaires...) (Rennes *et al.*, 2023). Bien que complexes, dans la mesure où elles doivent être instruites parfois au cas par cas, en fonction de l'utilisateur et de la donnée diffusée, ces questions ne devraient pas être un frein à long terme à un partage des données avec le plus grand nombre, d'autant que d'autres communautés ont réussi à résoudre ces problèmes. Des travaux juridiques sont encore en cours et vont se poursuivre sur ce sujet afin de faciliter l'accès à ces données (Fantappiè *et al.*, 2021).

Pour que des données sol soient utiles au plus grand nombre, il faut qu'elles soient accessibles facilement. Ceci peut sembler une évidence mais, dans le cadre des données du GIS Sol, ce n'est pas toujours le cas. Si le site du GIS Sol reste l'un des principaux points d'entrée pour accéder aux données du GIS, il n'existe pas de version en anglais et tous les jeux de données ne sont pas traduits, ce qui élimine d'emblée toute la population non francophone. Même si les moteurs de recherche permettent de traduire les contenus des sites, c'est un frein non négligeable à la recherche sur la thématique du climat, car pour ne parler que de la recherche française, de nombreux étudiants, post-doctorants et salariés étrangers peuplent nos laboratoires et certaines de nos institutions. Peut-être faut-il également envisager, au-delà du site du GIS Sol, de mettre en ligne ces données sur d'autres sites nationaux, plus connus, comme le géoportail national par exemple.

Un effort devrait également être fait pour contacter, et si besoin former, les communautés d'utilisateurs potentiels afin de leur faire connaître ces données. De nombreux chercheurs s'intéressent à la disponibilité en eau, au climat ou à la production

de biomasse par exemple ont besoin de données sur les sols qui soient de haute qualité afin de contraindre au mieux leurs outils et malheureusement il semblerait que ces communautés ne connaissent pas ou mal l'ensemble des données du GIS sol. Cette affirmation est plus une observation qu'une réelle étude mais il serait intéressant de réaliser une enquête auprès des chercheurs travaillant en lien avec les problématiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, afin d'estimer leurs niveaux de connaissances concernant ces données, et d'améliorer la diffusion.

En conclusion de cette partie, les données du GIS sol pourraient être comparées à un volcan endormi qui aurait une activité potentielle très importante mais qui ne s'exprime pas, ou trop peu. Il faut donc tout faire pour que s'expriment au maximum les capacités des données du GIS à nous informer sur les sols du territoire. L'investissement accordé par les différents services de l'état pour obtenir ces données est important mais négliger la partie diffusion et accessibilité des données rend ces investissements peu efficaces. Il est donc urgent de mobiliser des moyens humains et financiers supplémentaires et pérennes pour permettre un accès simple et rapide à ces données. Ces moyens humains pourraient notamment traiter des difficultés réglementaires et d'outils d'interrogation pour ainsi permettre une meilleure diffusion des données. Ces travaux doivent être mis en place au sein du GIS Sol et en partenariat avec d'autres membres que sont par exemple l'IGN et le BRGM. Un exemple efficace de diffusion des données et qui pourrait être suivi est le Joint Research Center (JRC) qui produit des données sols entre autres à l'échelle de l'union européenne. Ces données sont disponibles via un unique portail suivant un format commun quel que soit le type de données et les équipes du JRC sont très actives pour communiquer autour des nouveaux produits notamment via une newsletter et les réseaux sociaux.

4. LE FUTUR DES PROGRAMMES D'ACQUISITION ?

Les grands programmes d'acquisition de données du GIS Sol évoluent. Certains sont matures et ne s'enrichissent plus (par exemple la BDGSF). D'autres, tels que les programmes IGCS, BDAT et RMQS, qui sont indissociables des activités de recherche, en amont pour définir les modalités de l'acquisition des données, et en aval pour produire de nouvelles connaissances via l'analyse des données brutes, continuent d'évoluer. Cette évolution se fait grâce à l'acquisition de nouvelles données en nombre et en diversité, le traitement de la donnée, ou encore l'apparition de projets connexes (comme par le passé les projets *GlobalSoilMap* ou encore *Ecomic-RMQS*). Cela s'applique naturellement à la thématique de l'adaptation et de l'atténuation du changement climatique. Nous y anticipons par exemple une meilleure association entre modélisation dynamique statistique

et mécaniste) des variations du COS, dans un but d'amélioration de notre compréhension des déterminants des variations de COS et notre aptitude à réaliser des projections. Les données du RMQS sont centrales sur ce point, et leur utilisation dans cet objectif devrait bénéficier du travail sur les données de gestion, de l'avancement de la deuxième campagne et enfin de la mise en place de programmes majeurs tels que le programme national de recherche et d'équipement prioritaire (PEPR) FairCarboN (<https://faircarbon.wordpress.com/>). Ce programme permettra notamment la valorisation des données de différentes campagnes du RMQS et sera un élément essentiel de la prise en compte de la fonction puits des sols, vis-à-vis des gaz à effet de serre, notamment dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas Carbone. Les données IGCS devraient également, à terme, compléter celles de la BDGSF en proposant des informations pédologiques plus précises. Ces dernières pourraient être particulièrement utiles pour améliorer, depuis des échelles relativement locales (e.g. les échelles de la petite région agricole) jusqu'aux nationales, les cartographies numériques du COS, ainsi que les simulations spatialisées des modèles sol et sol/plante. En matière de cartographie numérique des sols, l'utilisation des RRP, qui représentent mieux la distribution spatiale fine des types de sols que la carte actuellement utilisée (i.e. tirée de la BDGSF), aboutira à des prédictions des niveaux de COS plus précises que celles diffusées actuellement par le GIS Sol. Dans cette même logique d'amélioration des produits résultant du traitement des données du GIS Sol, les liens avec d'autres bases de données pourraient être renforcés, à la fois pour mutualiser des efforts en termes de gestion de l'information, mais aussi en matière de recherches de complémentarités avec d'autres jeux de données (e.g. les complémentarités entre le RMQS et LUCAS Soil, qui font l'objet de travaux dans le programme EJP-Soil ou entre le RMQS et la BDAT pour les sols agricoles; les données de télédétection semblent également présenter un fort potentiel en matière d'estimation des teneurs en COS des sols et de forçage des modèles). Enfin, en ce qui concerne les estimations des émissions de N_2O et CH_4 , qui contrairement au CO_2 ne peuvent être directement estimées par l'observation des variations des propriétés du sol, un renforcement des collaborations avec les communautés travaillant sur ce type d'émissions serait utile. Elle permettrait de contribuer plus efficacement aux politiques d'atténuation sur ces aspects.

La BDAT est alimentée depuis sa création par les résultats d'analyses de terre qu'un certain nombre de laboratoires d'analyses, membres du GEMAS, lui ont transmis. La mise en place du RGPD, il y a quelques années, a rompu temporairement cette chaîne d'enrichissement continu de la base le temps de réaliser une étude juridique concertée entre les juristes de INRAE, d'Arvalis et d'Aurélia afin de trouver un cadre juridique protégeant les transferts des données anonymisées.

Une voie complémentaire a été suggérée lors des échanges entre les porteurs et les partenaires du projet ABC'Terre-2a et les

représentants des Ministères et de l'ADEME : que les analyses de terre et les descriptions de sol réalisées dans le cadre de projets financés par des crédits publics, d'origine nationale ou régionale, en France, soient obligatoirement reversées à la BDAT et IGCS. Une première application de cette proposition a été inscrite dans l'appel à projets « Bons diagnostics Carbone » de l'ADEME, lancé en novembre 2021. Il serait intéressant que cette condition figure dans tous les nouveaux appels à projets nationaux soutenant des caractérisations de sol et des analyses de terre, d'autant que des développements sont en cours pour intégrer ces données plus facilement dans les bases de données nationales.

5. CONCLUSION

Les données du GIS Sol ont été, depuis plusieurs décennies, au cœur d'études mandatées par les pouvoirs publics et de la recherche sur l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, une recherche qui produit les connaissances sur lesquelles peuvent s'appuyer les décideurs publics. Ces données permettent de mieux comprendre et caractériser les rôles passé, présent et futur des sols en lien avec le changement climatique. Le potentiel des données du GIS Sol est toutefois sous-exploité, pour différentes raisons, et notamment la complexité de la donnée sol et son accès. Il semble raisonnable de préconiser un renforcement des efforts pour la faire mieux connaître, notamment auprès des communautés scientifiques et d'autres utilisateurs qui travaillent sur le changement climatique, d'améliorer son accessibilité et son inter-opérabilité. Il est indispensable de systématiser l'application des principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) à la diffusion des données du GIS Sol, entre autres pour les données concernées par les thématiques climatiques. Ce sont les conditions pour la réalisation du plein potentiel des programmes du GIS, des programmes en évolution permanente, en matière de recherche et d'appui aux politiques pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Si le GIS Sol a déjà initié cette transition, des programmes tels que l'EJP SOIL et le PEPR FairCarboN devraient permettre d'accélérer la mise en visibilité de ces données, en travaillant à la fois sur les questions juridiques mais également sur les formats d'échange des données et les portails de diffusion. Cela placera la France en bonne position dans les discussions sur la construction d'un espace européen s'intéressant à la santé des sols, à travers notamment l'observatoire européen des sols (EUSO, <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/euso/euso-dashboard>).

REMERCIEMENTS

Nous remercions les tutelles du GIS Sol ainsi que l'ensemble des personnes ayant contribué aux programmes du GIS.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME I-CARE & Consult (2016). Sols et Changement climatique : Impacts et Adaptation. Etat des lieux de la recherche et identification de pistes de recherche. 93 pages.
- ADEME (2018). <https://www.territoires-climat.ademe.fr/actualite/loutil-aldo-pourune-premiere-estimation-de-la-sequestration-carbone-dans-les-sols-etla-biomasse>
- ADEME (2020). <https://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/productionagricole/passer-a-laction/dossier/levaluation-environnementale-agriculture/loutil-climagri>
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.-A., Soussana J.-F., Stengel P. (2002). Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? INRA. 332 pages.
- Bourdellot S. (2020). Influence du changement de support géographique de l'information pédologique dans les démarches de cartographie des services écosystémiques des sols (Mémoire Master 2). Parcours Gestion des sols et services écosystémiques, Université Paris-Saclay-AgroParisTech, INRAE Infosol.
- Bruni E., Chenu C., Abramoff R.Z., Baldoni G., Barkusky D., Clivot H., Huang Y., Kätterer T., Pikula D., Spiegel H., Virto I., Guenet B. (2022). Multi-modelling predictions show high uncertainty of required carbon input changes to reach a 4% target. *European Journal of Soil Science* 73, 1–26. <https://doi.org/10.1111/ejss.13330>
- Cécillon L., Baudin F., Chenu C., Houot S., Jolivet R., Kätterer T., Lutfalla S., Macdonald A., van Oort F., Plante A.F., Savignac F., Soucémariadin L.N., Barre P. (2018). A model based on Rock-Eval thermal analysis to quantify the size of the centennially persistent organic carbon pool in temperate soils. *Biogeosciences* 15, 2835–2849. <https://doi.org/10.5194/bg-15-2835-2018>
- Chen S., Arrouays D., Angers D.A., Chenu C., Barré P., Martin M.P., ... 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, 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.249>
- CITEPA (2022). Rapport OMINEA – 19ème édition.
- Clivot H., Mouny J.-C., Duparque A., Dinh J.-L., Denoroy P., Houot S., Vertès F., Trochard R., Bouthier A., Sagot S., Mary B. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software* 118, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
- Curien M., Issanchou A., Degan F., Manneville V., Saby N.P.A., Dupraz P. (2021). Spreading herbivore manure in livestock farms increases soil carbon content, while granivore manure decreases it. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 30. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00682-3>
- Delahaie A.A., Barré P., Baudin F., Arrouays D., Bispo A., Boulonne L., Chenu C., Jolivet C., Martin M.P., Ratié C., Saby N.P.A., Savignac F., Cécillon L. (2023). Elemental stoichiometry and Rock-Eval thermal stability of organic matter in French topsoils. *SOIL* 9, 209–229. <https://doi.org/10.5194/soil-9-209-2023>
- Ecuru J., MacRae E., Lang C. (2022). Bioeconomy: game changer for climate action. *Nature* 610, 630–630. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-03405-0>
- Fantappiè M., Peruginelli G., Conti S., Rennes S., van Egmond F., Le Bas C. (2021). Report on the national and EU regulations on agricultural soil data sharing and national monitoring activities. https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_D6.2_Report_on_national_and_EU_regulations_on_agricultural_soil_data_sharing.pdf
- Farina R., Marchetti A., Francaviglia R., Napoli R., Di Bene C. (2017). Modeling regional soil C stocks and CO₂ emissions under Mediterranean cropping systems and soil types. *Agriculture Ecosystems & Environment* 238, 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.015>
- Guenet B., Gabrielle B., Chenu C., Arrouays D., Balesdent J., Bernoux M., Bruni E., Caliman J.P., Cardinael R., Chen S., Ciais P., Desbois D., Fouche J., Frank S., Henault C., Lugato E., Naipal V., Nesme T., Obersteiner M., Pellerin S., Powelson D.S., Rasse D.P., Rees F., Soussana J.-F., Su Y., Tian H., Valin H., Zhou F. (2021). Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? *Global Change Biology* 27, 237–256. <https://doi.org/10.1111/gcb.15342>
- Guichard L., Ballot R., Glachant C., Aubert C. (2013) PERSYST, un outil d'estimation des PERformances agronomiques de SYSTèmes de culture - Adaptation à l'agriculture biologique en Ile-de-France. *Innovations Agronomiques* 32, 123–138
- Hénault C., Bourenne H., Ayzac A., Ratié C., Saby N.P.A., Cohan J.-P., Eglin T., Gall C.L. (2019). Management of soil pH promotes nitrous oxide reduction and thus mitigates soil emissions of this greenhouse gas. *Sci Rep* 9, 20182. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56694-3>
- Henin S., Dupuis M. (1945). Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales d'Agronomie* 1, 6–27.
- INRA (2018). Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000 version 3.2.8.0, 10/09/1998. <https://doi.org/10.15454/BPN57S>
- Jolivet C., Arrouays D., Boulonne L., Saby N., Avec la collaboration technique de Berché P., Laloua D., Lehmann S., Tientcheu E., Yart G. (2006). Le Réseau de mesures de la Qualité des sols de France (RmQs) - Etat d'avancement et premiers résultats. *Étude et Gestion des Sols* 13, 149–164
- Juerges N., Hansjürgens B. (2018). Soil governance in the transition towards a sustainable bioeconomy – A review. *Journal of Cleaner Production* 170, 1628–1639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.143>
- Kanari E., Cécillon L., Baudin F., Clivot H., Ferchaud F., Houot S., Levavasseur F., Mary B., Soucémariadin L., Chenu C., Barré P. (2022). A robust initialization method for accurate soil organic carbon simulations. *Biogeosciences* 19, 375–387. <https://doi.org/10.5194/bg-19-375-2022>
- Lafont S., Zhao Y., Calvet J.-C., Peylin P., Ciais P., Maignan F., Weiss M. (2012). Modelling LAI, surface water and carbon fluxes at high-resolution over France: comparison of ISBA-A-gs and ORCHIDEE. *Biogeosciences*, 9, 439–456. <https://doi.org/10.5194/bg-9-439-2012>, 2012.
- Laroche B., Degan F., Koller R., Scheurer O., Bouthier A., Moulin J., Sauter J., Ducommun C., Fort J.-L., Maillat S., Party J.-P., Renouard C., Saby N.P.A., Bertouy B. (2020). TYPTERRES : Vers une typologie agronomique partagée. *Étude et Gestion des Sols* 27, 241–255.
- Laroche B., Richer-de-Forges A.C., Tientcheu Nguenka M.E., Lehmann S., Helies F., Bardy M., Moreira N., Le Barh C., Fourvel G., Guellier C., Arrouays D. (2013). Le programme IGCS.
- Launay C., Constantin J., Chlebowsky F., Houot S., Graux A.-I., Klumpp K., Martin R., Mary B., Pellerin S., Therond O. (2021). Estimating the carbon storage potential and greenhouse gas emissions of French arable cropland using high-resolution modeling. *Global Change Biology* 27, 1645–1661. <https://doi.org/10.1111/gcb.15512>
- Mao Z., Derrien D., Didion M., Liski J., Eglin T., Nicolas M., Jonard M., Saint-André L. (2019). Modeling soil organic carbon dynamics in temperate forests with Yasso07. *Biogeosciences* 16, 1955–1973. <https://doi.org/10.5194/bg-16-1955-2019>
- Martin M.P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Boulonne L., Arrouays D. (2011). Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences* 8, 1053–1065. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1053-2011>
- 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. Le RMQS pour l'étude du carbone organique des sols. Étude et Gestion des Sols* 29, 327–349.
- Martin M.P., Dimassi B., Román Dobarco M., Guenet B., Arrouays D., Angers D.A., Blache F., Huard F., 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, 2458–2477. <https://doi.org/10.1111/gcb.15547>
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gommis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O.,

- Yu R., Zhou B. (2021). Climate change 2021: The physical science basis summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1260/095830507781076194>
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke S., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui C.-C., Vågen T.-G., van Wesemael B., Winowiecki L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Mulder V.L., Lacoste M., Richer-de-Forges A.C., Martin M.P., Arrouays D. (2016). National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. *Geoderma* 263, 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.035>
- Parton W.J., Schimel D.S., Cole C.V., Ojima D.S. (1987). Analysis of Factors Controlling Soil Organic Matter Levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51, 1173–1179. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100050015x>
- Pellerin S., Bamière L., Savini I., Rechauchère O., Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Bellassen V., Cardinael R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Daroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A.-I., Guenet B., Houot S., Klumpp K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri-Aubry S., Mezière D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Therond O., Viaud V., Grateau R., Le Perchec S. (2021). Stocker du carbone dans les sols français, Matière à débattre et décider. Éditions Quæ.
- Petrescu A.M.R., Qiu C., Ciais P., Thompson R.L., Peylin P., McGrath M.J., Solazzo E., Janssens-Maenhout G., Tubiello F.N., Bergamaschi P., Brunner D., Peters G.P., Höglund-Isaksson L., Regnier P., Lauerwald R., Bastviken D., Tsuruta A., Winiwarter W., Patra P.K., Kuhnert M., Oreggioni G.D., Crippa M., Saunio M., Perugini L., Markkanen T., Aalto T., Groot Zwaaftink C.D., Tian H., Yao Y., Wilson C., Conchedda G., Günther D., Leip A., Smith P., Haussaire J.-M., Leppänen A., Manning A.J., McNorton J., Brockmann P., Dolman A.J. (2021). The consolidated European synthesis of CH₄ and N₂O emissions for the European Union and United Kingdom: 1990–2017. *Earth System Science Data* 13, 2307–2362. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2307-2021>
- Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M.F., Derrien D., Gioacchini P., Grand S., Gregorich E., Griepentrog M., Gunina A., Haddix M., Kuzyakov Y., Kuehnelt A., Macdonald L.M., Soong J., Trigalet S., Vermeire M.-L., Rovira P., van Wesemael B., Wiesmeier M., Yeasmin S., Yevdokimov I., Nieder R. (2018). Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils - A comprehensive method comparison. *Soil Biol. Biochem.* 125, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025>
- 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. *Etude et Gestion des Sols*, 30, 253–262.
- Riggers C., Poeplau C., Don A., Bamminger C., Höper H., Dechow R. (2019). Multi-model ensemble improved the prediction of trends in soil organic carbon stocks in German croplands. *Geoderma* 345, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.014>
- Rodrigues L., Hardy B., Huyghebaert B., Fohrafellner J., Fornara D., Barančíková G., Bárcena T.G., De Boever M., Di Bene C., Feizienė D., Kätterer T., Laszlo P., O'Sullivan L., Seitz D., Leifeld J. (2021). Achievable agricultural soil carbon sequestration across Europe from country-specific estimates. *Global Change Biology* 27, 6363–6380. <https://doi.org/10.1111/gcb.15897>
- Saby N., Foucaud Lemerrier B., Arrouays D., Leménager S., Louis B., Millet F., Paroissien J.B., Schellenberger E., Squidant H., Swiderski C., Toutain B., Walter C., Bardy M. (2014). Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) : Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Etude et Gestion des Sols* 21, 141–150.
- Scheurer O., Bousselin X., Saby N. (2020). Une méthode pour caractériser les teneurs en carbone organique des types de sol d'un Référentiel Régional Pédologique sur un territoire agricole à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. *Etude et Gestion des Sols* 27, 189–207.
- Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Koegel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Sleutel S., De Neve S., Hofman G. (2007). Assessing causes of recent organic carbon losses from cropland soils by means of regional-scaled input balances for the case of Flanders (Belgium). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 78, 265–278. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9090-x>
- Svendsen H., Hansen S., Jensen H.E. (1995). Simulation of crop production, water and nitrogen balances in two German agro-ecosystems using the DAISY model. *Ecological Modelling*, Modelling of Geo-Biosphere Processes 81, 197–212. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)00171-D](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)00171-D)
- von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B. (2007). SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 2183–2207. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.007>

L'offre du GIS Sol en appui aux questions de santé : les données disponibles et leur utilisation pour les politiques publiques et la recherche

C. Froger⁽¹⁾, A. Pelfrène⁽²⁾, J.-L. Volatier⁽³⁾, H. Roussel⁽⁴⁾, F. Marot⁽⁴⁾, J.-F. Brunet⁽⁵⁾, N.P.A. Saby^(1*), et A. Bispo^(1*)

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

2) Univ. Lille, IMT Nord Europe, Univ. Artois, Junia, ULR 4515 - LGCGE, Laboratoire de génie Civil et géo-Environnement, 59014 Lille, France

3) ANSES, Département de l'Evaluation des Risques, 94701 Maisons-Alfort, France

4) ADEME, Service Friches Urbaines et Sites Pollués, 49004 Angers, France

5) BRGM, 3 avenue Claude-Guillemin, 45060 Orléans, France

* Auteur correspondant : antonio.bispo@inrae.fr ; nicolas.saby@inrae.fr

RÉSUMÉ

Les sols peuvent impacter notre santé car ils présentent des éléments ou des molécules qui, par absorption directe ou indirecte, peuvent entraîner des effets néfastes. Le groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS Sol) pilote des programmes d'acquisition de données sur les sols, notamment sur les contaminants, et est responsable de leur gestion, leur traitement et leur diffusion. Les données du GIS Sol ont été, depuis sa création, mobilisées pour appuyer les politiques publiques nationales et les travaux de recherche traitant du lien entre santé et pollution des sols. Cet article a pour objectif de présenter les bases de données du GIS Sol disponibles répertoriant différents contaminants dans les sols et de détailler plusieurs utilisations de ces données dans le cadre de travaux sur la santé humaine ou en appui de politiques nationales sanitaires. Parmi les différentes applications, les données ont notamment été utilisées afin de produire des indicateurs statistiques nationaux pour la gestion des sites et sols pollués ou encore pour aider à définir des seuils réglementaires de production d'engrais en lien avec l'exposition au cadmium de la population. Plusieurs projets de recherche utilisant ces données sols sont également présentés, traitant notamment de la bioaccessibilité de l'arsenic, de l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'hydrocarbures aromatiques polycycliques ou encore l'évaluation des inégalités environnementales. En complément des

Comment citer cet article :

Froger C., Pelfrène A., Volatier J.-L., Roussel H., Marot F., Brunet J.-F., Saby N.P.A., et Bispo A., 2023 - 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, 235-252

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

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

travaux existants, la capitalisation et l'acquisition de nouvelles données sur d'autres polluants (e.g. microplastiques, PFAS, pesticides, médicaments) sont capitales pour intégrer pleinement l'état des sols dans une vision holistique de la santé (concept « One Health »).

Mots-clés

Sol, élément trace, contaminant organique, GIS Sol, France, santé humaine, pollution, valeur de référence.

SUMMARY

THE USE OF GISSOL DATA FOR HEALTH POLICIES

Soil pollution by inorganic and/or organic contaminants can impact human health through direct adsorption or indirect pathways and needs to be considered in public health policies. The Scientific Group of Interest in soil (i.e. GIS Sol in French) is in charge of soil survey and monitoring programs at national scale to collect and manage soil data, including data on contaminants. Soil quality databases has been used in public health policies and research programs on the links between soil pollution and human health. This article purpose is to expose the GIS Sol databases available on soil pollution and to present some of the applications using those datasets for public policies and research programs. Soil data were processed to produce a set of national indicators for polluted site management and also to define threshold values for fertilizers production based on population exposure to cadmium. Soil data were also used in various research projects dealing with arsenic bioaccessibility, the risk induced by polycyclic aromatic hydrocarbon in soil for local populations or environmental inequalities due to the territorial differences in population exposure to contaminants. In addition, collecting new data on other pollutants (e.g. microplastics, PFAS, pesticides, drugs) is essential to fully integrate soil into a holistic vision of health ("One Health" concept).

Key-words

Soil, trace element, organic contaminant, GIS Sol, France, human health, pollution, reporting.

RESUMEN

LA OFERTA DEL GIS SOL EN APOYO DE LAS CUESTIONES DE SALUD:

Los datos disponibles y su utilización para las políticas públicas y la investigación

Los suelos pueden afectar a nuestra salud, ya que presentan elementos o moléculas que, por absorción directa o indirecta, pueden provocar efectos nocivos. El Grupo de Interés Científico Suelo (GIS Sol) dirige programas de adquisición de datos sobre los suelos, especialmente sobre los contaminantes, y es responsable de su gestión, tratamiento y difusión. Desde su creación, se movilizaron los datos del GIS Sol para apoyar las políticas públicas nacionales y las investigaciones sobre la relación entre salud y contaminación de los suelos. El objetivo de este artículo es presentar las bases de datos del GIS Sol disponibles que identifican diferentes contaminantes en los suelos y detallar varios usos de estos datos en el marco de trabajos sobre la salud humana o en apoyo de políticas nacionales sanitarias. Entre las diferentes aplicaciones, se utilizaron los datos, en particular, para producir indicadores estadísticos nacionales para la gestión de los sitios y suelos contaminados o para ayudar a definir umbrales reglamentarios de producción de fertilizantes en relación con la exposición de la población al cadmio. También se presentan varios proyectos de investigación que utilizan estos datos de suelos, en particular sobre la bioaccesibilidad del arsénico, la evaluación de los riesgos sanitarios relacionados con la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos o la evaluación de las desigualdades medioambientales. Como complemento de los trabajos existentes, la capitalización y la adquisición de nuevos datos sobre otros contaminantes (e.g. microplásticos, PFAS, plaguicidas, medicamentos) es capital para integrar plenamente el estado de los suelos en una visión holística de la salud (concepto «One Health»).

Palabras clave

Suelos, elementos traza, contaminantes orgánicos, GIS Sol, Francia, salud humana, contaminación, valores de referencia.

1. INTRODUCTION

Le sol est défini par les pédologues et les géologues comme la couche supérieure de la croûte terrestre, transformée par des processus climatiques, physico-chimiques et biologiques, et composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants, organisée en horizons génériques. On distingue ainsi le sol de surface et le cas échéant le sol profond sous-jacent.

Le sol est rarement associé à la notion de santé, bien qu'il exerce une influence certaine, directement ou indirectement, sur notre santé et notre bien-être. Ainsi, l'adage populaire « nous sommes ce que nous mangeons » traduit ce lien au sol et plusieurs synthèses rappellent d'ailleurs que l'idée que la santé humaine est liée au sol n'est pas nouvelle (Brevik et Sauer, 2015). Les sols sont nécessaires à notre survie sur Terre car (1) ils influencent la disponibilité et la qualité de la nourriture (sécurité alimentaire), (2) nous fournissent des matériaux (ex : bois, fibres, argile) pour nos vêtements, nos constructions ou encore notre chauffage, (3) filtrent les eaux, garantissant leur potabilité...

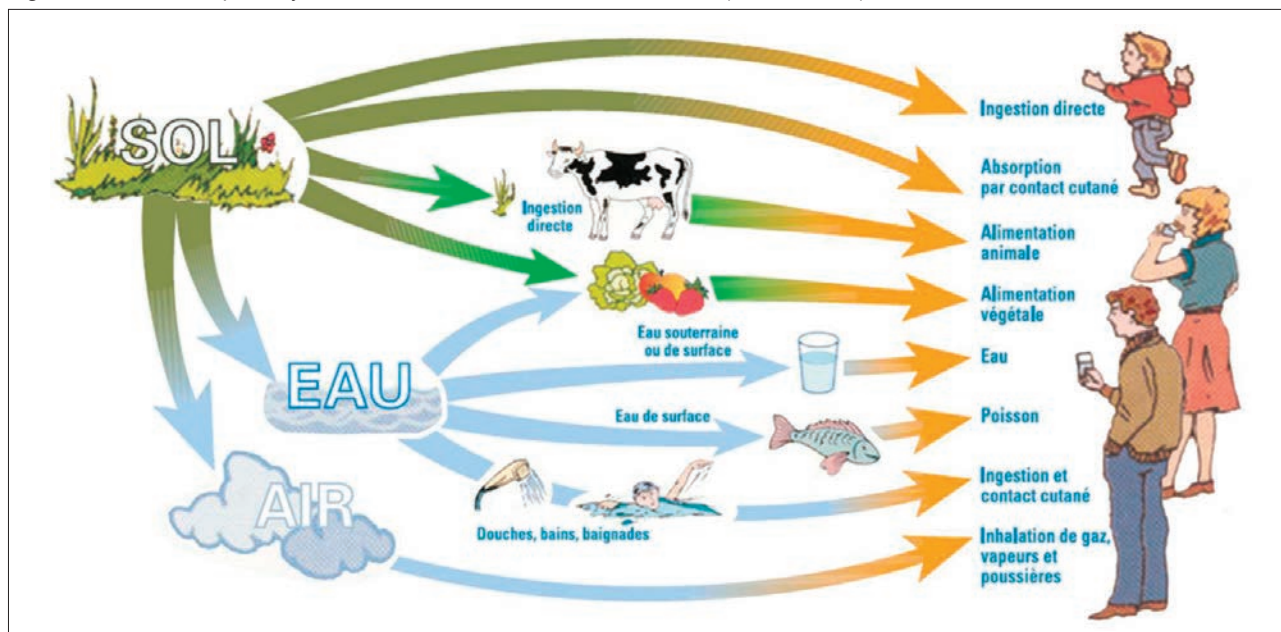
Cependant, les sols peuvent également impacter notre santé car ils sont susceptibles de contenir des éléments (ex : métaux, métalloïdes) et des molécules (ex : hydrocarbures, pesticides) pouvant présenter un risque pour la santé humaine. Différentes voies sont impliquées dans le transfert des contaminants présents dans les sols (*Figure 1*) : les voies d'exposition « directes » notamment l'ingestion de sol, le contact cutané et l'inhalation de poussières ; et les voies d'exposition « indirectes » via l'alimentation principalement (végétale, ani-

male, eau de boisson). Pour les jeunes enfants (nourrissons et enfants en bas âge), l'ingestion de sol est la voie d'exposition majoritaire dans le cas des polluants non volatils, du fait du comportement mains-bouche. Les bases de données sur les facteurs d'exposition prennent généralement en compte cette exposition directe (Phillips et Moya, 2014). Une étude récente de validation par biomarqueurs métalliques dans les fèces d'enfants en bas âge estime la quantité moyenne de sol ingérée à 35 mg/jour soit autant que les poussières (Yoon *et al.*, 2020). Parfois, les quantités ingérées sont estimées à des niveaux plus élevés de 100 à 150 mg/j (Dor *et al.*, 2009), intégrant à la fois le sol et les poussières, indépendamment de comportements de type géophagie ou syndrome pica. L'exposition humaine aux substances chimiques présentes dans les sols provient cependant et plus généralement du transfert de ces substances vers les plantes et les animaux, eux-mêmes consommés par l'homme. L'aptitude des contaminants à passer du compartiment sol à un être vivant est appelée biodisponibilité (Gevao *et al.*, 2000 ; Girard *et al.*, 2011). Leur transfert vers les matrices biologiques (animales, végétales) est dépendant des propriétés intrinsèques des substances mais aussi des caractéristiques du sol telles que la teneur en argile et en matière organique (Adriano, 2001 ; Semple *et al.*, 2003).

Dans le cas du chlordécone aux Antilles, l'exposition des populations par les produits alimentaires, légumes racines, volailles et œufs issus des jardins familiaux est importante d'autant plus que ces denrées sont moins contrôlées que celles vendues dans les commerces ou sur les marchés (Anses, 2017). Néanmoins, si la voie alimentaire peut être majoritaire

Figure 1 : Les différentes voies de transfert des contaminants du sol à l'humain (source : Ineris)

Figure 1 : The various pathways of contaminant transfer from soil to human (source : Ineris)



pour la population générale, d'autres voies d'expositions comme l'ingestion de sol ou l'inhalation de poussières peuvent prédominer pour certaines populations locales exposées à des sols particulièrement pollués ou pour des catégories professionnelles spécifiques (agriculteurs, employés d'entreprises de dépollution...).

Les sols sont donc au centre des dynamiques de transferts des contaminants et l'acquisition de connaissances à l'échelle nationale est nécessaire pour évaluer leur contamination, compte-tenu de l'absence de législation européenne en termes de surveillance des sols, contrairement à l'air ou les milieux aquatiques. Ces données ont également un intérêt local pour l'évaluation des sites et sols pollués grâce à la production d'un référentiel de teneurs auxquelles comparer les mesures de terrains pollués. De plus, des jeux de données complets incluant à la fois les pratiques et occupations du sol et les caractéristiques physico-chimiques permettent d'investiguer des relations potentielles entre les contaminants et les propriétés des sols pour mieux modéliser et prévoir leur devenir dans l'environnement. Enfin, les approches « One Health » ou « Une seule santé » visant à considérer la santé humaine comme intimement liée à celle des écosystèmes et des animaux ne peuvent se penser qu'en intégrant les sols dans l'évaluation de l'exposition (INRAE, 2020). Les données de contamination des sols présentent ainsi de multiples intérêts pour les politiques de santé publique actuelles et futures. Ainsi, les objectifs de cet article sont : (1) de décrire les bases des données du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) disponibles aujourd'hui à l'échelle de la France et leurs caractéristiques ; (2) de présenter plusieurs exemples d'utilisations de ces données dans différents domaines liés à la santé, notamment dans la gestion des sites et sols pollués, dans des recherches sur l'évaluation des expositions et des risques pour les populations (Cd, As et HAP) ou des évaluations d'impacts socio-environnementaux des contaminations des sols.

2. LES BASES DE DONNÉES DISPONIBLES

2.1 Le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS)

Le dispositif de mesures du programme RMQS se fonde sur un plan d'échantillonnage dans l'espace et dans le temps. Dans l'espace, la stratégie retenue correspond à un échantillonnage aléatoire systématique, soit une grille systématique de 16 km de côté. Ce type de stratégie d'échantillonnage permet d'obtenir des inférences statistiques valides basées sur des estimations sans biais et précises des paramètres des distributions statistiques (Brus et Saby, 2016). Par ailleurs, cette stratégie

est également adaptée à l'ajustement de modèles statistiques de type régression (Meersmans *et al.*, 2012) et de type géostatistique (Saby *et al.*, 2011). La résolution de 16 km x 16 km a quant à elle été définie de façon à couvrir, avec cette grille, la majorité des combinaisons type de sol-classe d'occupation des sols (Arrouays *et al.*, 2002). Dans le temps, la stratégie retenue correspond à une stratégie par panel rotatif (Brus, 2014) facilitant la production de manière précoce des sorties sur l'état et les possibles évolutions de différentes propriétés des sols. Les échantillons sont stockés au Conservatoire européen des échantillons de sol (CEES) situé à Orléans après séchage à 30 °C, tamisage et quartage selon une méthode normalisée (Arrouays *et al.*, 2003 ; Jolivet *et al.*, 2018).

De nombreux contaminants ont été mesurés dans les échantillons du RMQS prélevés lors de la première campagne de mesure, comme cela est résumé dans le *tableau 1*. Les mesures d'éléments traces métalliques (ETM) ont été réalisées pour les échantillons de surface et subsurface, tandis que des analyses de polluants organiques, d'As et Hg ont été effectuées uniquement sur les échantillons de surface.

Des tableaux statistiques sont disponibles en ligne pour les substances dont les mesures sont assez nombreuses pour produire des statistiques considérées comme fiables (<https://traitementinfosol.pages.mia.inra.fr/statistiquesrmqs/>), comme pour les éléments traces métalliques (Saby *et al.*, 2020), les PCB et les HAP (Saby *et al.*, 2019). La consultation en ligne permet de filtrer en fonction de différents critères d'intérêt (substance, type d'extraction, etc.).

La spatialisation des données au niveau national a pour objectif de fournir des cartes informant sur les « teneurs habituelles » dans les sols français, correspondant au cumul du fond « pédo-géochimique » et des contaminations diffuses issues des activités humaines. Les différentes cartes produites sont disponibles en ligne et téléchargeables sous forme de raster (<https://data.inrae.fr/dataverse/gissol>). Les prédictions spatiales à une résolution de 1000 m des teneurs totales de 9 ETM y sont notamment disponibles.

2.2 Base de données des éléments traces métalliques (BDETM)

Dans le cadre de la réalisation des plans d'épandage des boues d'épuration, de très nombreuses analyses d'ETM dans les sols sont effectuées sur tout le territoire, conformément aux prescriptions du décret du 8 décembre 1997 complété par l'arrêté du 8 janvier 1998. Ainsi, les teneurs en sept ETM (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) sont déterminées sur des échantillons de sols prélevés en surface (horizons labourés) des terres essentiellement agricoles susceptibles de recevoir des épandages de boues de station d'épuration urbaine. Cela concerne des parcelles agricoles très diverses mais qui doivent correspondre aux critères suivants : disposition plane, hors zones

Tableau 1 : Description des mesures de contaminants effectuées sur le RMQS**Table 1 :** Overview of the contaminants measured in the soil samples from the RMQS

Molécules	Mesure	Programme	Profondeur
Cd, Cu, Co, Cr, Mo, Ni, Pb, Ti, Zn	Teneurs totales (HF + HClO ₄)	RMQS1 (tous les sites)	Surface (0 - 30 cm) Sub-surface (30 - 50 cm)
As et Hg	Teneurs totales	RMQS1 (tous les sites)	Surface (0 - 30 cm)
Cd, Cu, Mo, Ni, Pb et Zn	Teneurs extractibles (EDTA)	RMQS1 (tous les sites)	Surface (0 - 30 cm) Sub-surface (30 - 50 cm)
Polychlorobiphényles (PCB), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dioxines, furanes	21 PCB 16 HAP 75 dioxines 135 furanes	RMQS - POP (tous les sites)	Surface (0 - 30 cm)
Polybromodiphényléthers (PBDE), pesticides organochlorés (OCP), herbicides	39 PBDE 12 organochlorés (DDT, lindane, dieldrine...) 26 herbicides (triazines, phénylurés)	RMQS - OCP (550 sites)	Surface (0 - 30 cm)

à enjeu environnemental (nitrate). D'autres analyses sont parfois également réalisées, liées à la caractérisation agro-pédologique des échantillons de sols, telles que la granulométrie, le pH ou encore la matière organique. Toutes ces analyses portent sur la « terre fine » (< 2 mm) ce qui exclut donc tous les « éléments grossiers » de diamètre supérieur à 2 mm (graviers et cailloux). Ces analyses ont été collectées et répertoriées à partir de la fin des années 90 dans le cadre d'un projet entre l'ADEME et l'Unité INRAE de Sciences du Sol d'Orléans (Deslais et Baize, 1997). Le GIS Sol a ensuite repris ce projet en 1998 et gère désormais cette base de données dénommée BDETM. Différents organismes publics ou privés en charge de ces études sont ainsi sollicités dans le cadre du programme : des maîtres d'ouvrage (collectivités), des maîtres d'œuvre (bureaux d'étude ou chambre d'agriculture), des services instructeurs (DDT) ou des organismes de suivis (chambres d'agriculture, SATESE). La BDETM contient également des informations sur les prélèvements (localisation géographique, date de prélèvement, organisme responsable de l'étude préalable à l'épandage...) ainsi que sur les analyses (laboratoire, méthode utilisée). La principale hétérogénéité des données récoltées concerne les méthodes analytiques employées par les différents laboratoires pour la détermination des teneurs en ETM, en particulier la méthode de mise en solution préalable correspondant à l'extraction totale utilisant un mélange d'acides fort (HF et HClO₄) et à l'extraction « pseudo-totale » à l'eau régale (HNO₃ et HCl). Ces informations sont nécessaires afin de pouvoir comparer les résultats puisque les deux méthodes peuvent donner des teneurs différentes suivant les sols et les éléments considérés.

La base de données BDETM compte aujourd'hui plus de 73 400 sites référencés, avec un nombre croissant de données

collectées depuis les années 90 (Figure 2). De plus, des analyses effectuées dans le cadre d'études scientifiques ont été collectées afin d'alimenter la base de données.

Une grande disparité dans la répartition géographique des sites collectés s'observe à l'échelle du territoire (Figure 3) et qui est liée principalement aux contraintes sur les caractéristiques des parcelles épandables. Cette variabilité s'observe également au niveau des analyses puisque plus de 70 laboratoires différents ont été sollicités. Cependant, la diversité des laboratoires permet de s'affranchir de biais importants liés à des problèmes analytiques que l'on pourrait rencontrer avec un unique laboratoire responsable des analyses.

Au vu du nombre de sites collectés, on peut cependant considérer que ces données apportent des éléments objectifs de comparaison pour toute institution ou bureau d'études désirant confronter un résultat d'analyse à différents indicateurs statistiques en renseignant sur une gamme de variation observée.

De par leur origine, ces analyses correspondent à des teneurs habituelles des sols agricoles, c'est-à-dire la somme du fond pédo-géochimique et des contaminations locales liées aux activités agricoles. Leur traitement a permis la production de cartes des teneurs en éléments traces des sols agricoles français, notamment par krigeage. Les résultats de la BDETM ont ainsi été mis à disposition du public, à travers des webservices et des datasets (<https://doi.org/10.15454/4GNOS>). Cependant, aucun outil simple n'existe actuellement pour consulter directement ces données alors que plusieurs acteurs sont susceptibles d'être intéressés pour divers usages tels que l'établissement des fonds pédo-géochimiques pour la gestion des sites pollués ou des terres excavées mais aussi la connaissance de l'état des

Figure 2 : Nombre total par année de sites collectés dans la BDETM de 1983 à 2009.

Figure 2 : Total number of sites reported each year in the Trace Element Database from 1983 to 2009.

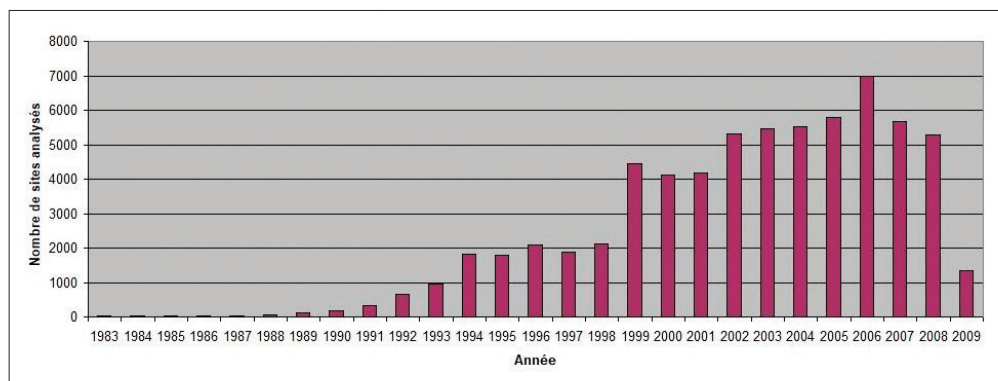
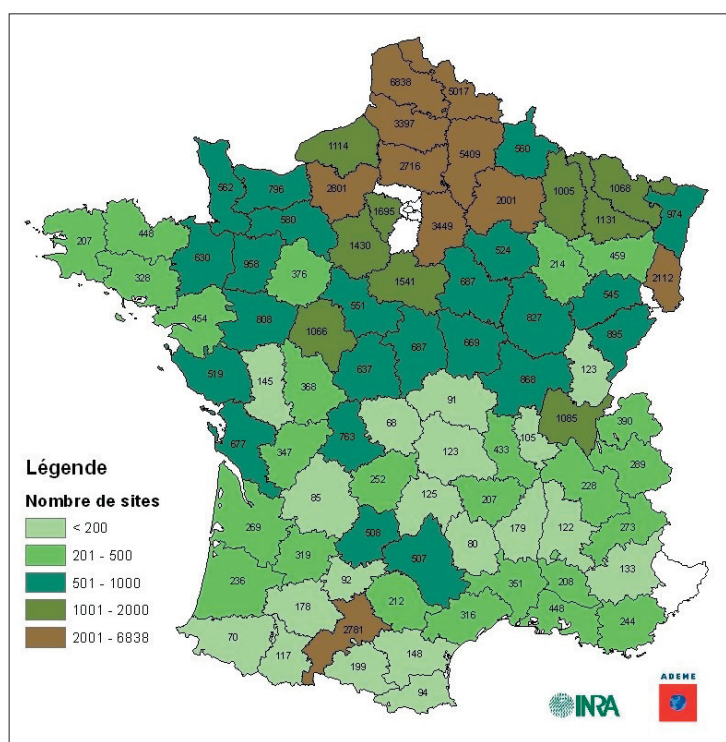


Figure 3 : Carte de répartition du nombre de sites référencés dans la BDETM par département.

Figure 3 : Map of the number of sites reported in the Trace Element Database for each department.



sols pour la santé et l'aménagement du territoire. Il est donc essentiel de faciliter leur accès/consultation, tout en veillant à respecter la réglementation en matière de diffusion de données puisqu'elles peuvent être considérées comme des données à caractère personnel et sont soumises au règlement général sur la protection des données (RGPD). Leur diffusion est donc strictement encadrée et nécessite la vérification du respect de ces règles avant toute mise en ligne.

2.3 Base de données des analyses de sols urbains (BDSolU)

Cette base se concentre sur les sols urbains, lesquels présentent des particularités par rapport aux sols agricoles et forestiers (Brunet et al., 2023). En effet, les villes sont remaniées en permanence par les activités humaines et ce depuis des siècles : constructions, démolitions, excavations, terrassements, apports de terres et remblais de matériaux, naturels ou non... Elles sont aussi le théâtre d'émissions atmosphériques diffuses de diverses substances (échappement des véhicules, cheminées des industries et des chauffages collectifs ou individuels) et localement de pollutions concentrées (ex : artisanat, industrie). C'est pourquoi les concentrations en ETM et aussi en composés organiques des sols urbains présentent souvent de fortes variations spatiales. On ne connaît pas, ou assez mal, les concentrations habituelles de ces substances d'origine naturelle ou anthropique : c'est-à-dire le fond pédo-géochimique anthropisé.

La BDSolU a été créée pour répondre à ce besoin. Le BRGM, avec le soutien de l'ADEME, a lancé en 2010 la collecte et la capitalisation d'analyses de sols en milieu urbain dans le cadre des projets « Établissement de fonds pédo-géochimiques urbains - FGU » et « Diagnostics des établissements accueillant des enfants et des adolescents - Établissements sensibles » (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2022a). Ce dernier, prévu par l'action 19 du 2^e Plan national santé environnement (2009-2013) (Ministère de la Santé et de la Prévention, 2022), visait la réduction des expositions aux substances préoccupantes dans les bâtiments accueillant les enfants. À partir de 2014, le projet FGU a aussi élargi la collecte des

données des sols urbains acquises en France à d'autres projets (BRGM, 2022a). Cette base, en cours de constitution, intègre de nombreuses informations permettant de décrire les différents lieux de prélèvement à différentes échelles géographiques :

- les registres d'occupation du sol dans la ville « OCSOL GE » développé par le CRIGE en région PACA (CRIGE, 2014) sur la base du standard Corine Land Cover (European Environment Agency, 1995) ;
- l'activité au niveau de la parcelle avec les codes NAF développés par l'INSEE (INSEE, 2021) ;
- l'environnement proche dans un rayon de quelques dizaines de mètres autour du point de prélèvement ;
- l'état de la surface du sol au point de prélèvement et, bien entendu, les coordonnées géographiques et altimétriques du point de prélèvement.

Les descriptions des sondages (nature des niveaux et matériaux rencontrés, indices organoleptiques) et des échantillons prélevés, sont également recueillies dans la base. Les méthodes de sondage (à la pelle, au carottier...), d'échantillonnage (échantillon composé d'un seul prélèvement ou d'un mélange de plusieurs prélèvements), de préparation des échantillons sur site (par exemple le retrait des éléments grossiers), et enfin de préparation et d'analyse au laboratoire ou sur site sont aussi bancarisées. Dans la plupart des cas, ces dernières informations sont codifiées selon les registres développés par le SANDRE (SANDRE, 2022).

La détermination de fonds pédo-géochimiques au moyen de la BDSolU a essentiellement pour objectif l'appui aux acteurs de l'aménagement dans le cadre de la réalisation de diagnostics de sites et sols (potentiellement) pollués (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2022b), et de la valorisation des terres excavées (BRGM, 2022b). Ainsi, les données de la BDSolU ont déjà contribué à la réalisation des référentiels de fonds pédo-géochimiques suivants :

- le projet GeoBaPa conduit par la société Soltracing sur la basse vallée de la Seine et achevé en 2021 (Soltracing, 2022) qui avait pour objectif de favoriser la valorisation des terres issues du chantier du Grand Paris Express,
- le projet FGU Toulouse conduit par le BRGM pour Toulouse Métropole en 2018 (Belbèze *et al.*, 2019) en vue de la détermination des fonds pédo-géochimiques urbains de la métropole toulousaine.

Ces données pourront également être utiles pour des évaluations quantitatives des risques sanitaires (EQRS), des études, étude d'impact ou comme référence d'un état des lieux, soit avant l'implantation d'une installation, soit post-accidentel.

3. LES UTILISATIONS DES BASES DE DONNÉES DU GIS SOL

Les utilisations des bases de données du GIS Sol sont diverses : elles permettent d'appuyer les politiques publiques nationales et les travaux de recherche.

3.1 Politiques nationales pour les sites et sols pollués

Selon la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués proposée par le ministère en charge de l'environnement (Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, 2017), l'appréciation de l'impact environnemental d'une friche, d'une installation industrielle ou d'un accident technologique nécessite de disposer d'un état de référence des milieux environnementaux. Cela rejoint la directive 2010/75/UE du Parlement européen relative aux émissions industrielles, dite IED, qui impose l'établissement d'un rapport de base pour toute nouvelle implantation d'installations industrielles. Ce rapport de base a pour objectif de dresser l'état de pollution des sols et des eaux souterraines avant la mise en fonctionnement de l'installation, de façon à disposer d'un référentiel au moment de sa mise à l'arrêt définitif et ainsi aider à fixer les objectifs de remise en état. Naturellement, comme la plupart des sites (potentiellement) pollués qui sont gérés aujourd'hui ont été mis en service avant cette directive, cela implique de recourir à d'autres référentiels. La politique nationale de gestion des sites et sols pollués et la démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées traduisent cet état de référence sous la notion d'Environnement Local Témoin (Droissart-Long, 2017). Il consiste à identifier une zone ou un ensemble de zones, comprenant les mêmes milieux d'exposition (par exemple des sols de même nature) mais dont l'étude historique a démontré l'absence d'influence du site étudié ou d'un autre contributeur (Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, 2017). Les bases de données regroupant les valeurs de fonds pédo-géochimiques naturels et anthropiques des sols permettent de consolider l'environnement local témoin, en plus des échantillons prélevés à proximité des sites d'étude, par des données reconnues, de bonne qualité, nombreuses, représentatives des teneurs habituelles locales et nationales. Ces bases de données établies en dehors d'un contexte spécifique et par des acteurs de la recherche scientifique, sont crédibles et donc considérées comme fiables et impartiales par les différentes parties.

Les observations collectées dans le cadre du RMQS ont ainsi été utilisées pour calculer un indicateur permettant la détection des concentrations considérées comme anormales pour évaluer la pollution des sites dans un contexte de gestion de sites et sols pollués (Villanneau *et al.*, 2008). Le mode de calcul

de cet indicateur permet de tenir compte du contexte local car il correspond à la vibrisse supérieure des valeurs observées dans un rayon de 50 km autour de la zone à caractériser. Ces seuils de détection d'anomalies sont disponibles en ligne (Saby *et al.*, 2018) sous un format SIG et donc consultables publiquement pour ces évaluations à l'échelle locale.

À l'échelle nationale, le calcul des vibrisses a également permis de mettre en évidence une pollution diffuse des sols liée à certaines activités humaines. On distingue en particulier l'impact des agglomérations sur les teneurs en Pb, Zn et Cd dans les sols ou encore l'influence des zones viticoles sur les teneurs en Pb et Cu et liés respectivement à l'utilisation d'arséniate de plomb et la bouillie bordelaise pour le traitement des vignes (Villanneau *et al.*, 2008). Les vibrisses permettent d'observer des teneurs anormales naturelles comme celles du Cd présent dans les sols développés sur des calcaires présentant des teneurs importantes en cadmium.

La reconquête des friches est encouragée par la loi ALUR de 2014 (Légifrance, 2014) et par le Plan France Relance (Ministère de l'économie et des finances, 2022). Cependant, les aménagements associés passent souvent par l'excavation de grandes quantités de terres, que les sites concernés soient pollués ou non. Les chiffres associés à l'aménagement des infrastructures du chantier du Grand Paris Express, dont l'achèvement est prévu pour 2030, donnent un bon exemple de la situation : 68 nouvelles gares, 4 nouvelles lignes de métro et l'extension de 2 lignes existantes pour un total de 200 km, soit le doublement du réseau actuel. Au total, 40 millions de tonnes de matériaux seront excavées (Grand Paris Express, 2022). À titre de comparaison, en 2015, en Île-de-France, le BTP a généré 28 millions de tonnes de déchets dont seulement 6 millions ont été recyclés (Eychène, 2019).

Or, ces terres ont longtemps dû se conformer à la réglementation sur les déchets dès lors qu'elles quittaient leur site d'origine. Aujourd'hui, elles sont parfois valorisées sur d'autres chantiers, mais sont encore souvent stockées dans des centres d'enfouissement. Ces centres sont de plus en plus saturés, notamment en région parisienne. Dans le même temps, les ressources minérales des carrières, que certaines de ces terres pourraient remplacer, se tarissent. À ce constat, ajoutons l'impact carbone du transport de ces matériaux qui se croisent parfois entre ville et campagne. Dans ce contexte, l'INERIS et le BRGM ont produit des guides de caractérisation (Coussy *et al.*, 2020) et de valorisation des terres excavées. Depuis 2012, le BRGM spécifie que les terres nécessitant d'être excavées et susceptibles d'être réutilisées doivent être caractérisées pour vérifier si leurs propriétés chimiques sont cohérentes avec le fond géochimique naturel ou anthropisé local. En 2020, cette approche a été confirmée dans deux guides de valorisation hors site des terres excavées, issues ou non de sites et sols pollués, publiés par le ministère en charge de l'environnement (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2020). Des

concentrations inférieures ou égales à celles caractérisant le fond pédo-géochimique du site receveur constituent l'une des conditions nécessaires à cette valorisation.

Dans le cadre de diagnostics ou d'études sanitaires (étude quantitative des risques sanitaires (EQRS), étude d'impact...) ou d'aménagement, le recours aux valeurs de fonds permet une analyse approfondie de la situation du site et des alentours. Grâce aux bases de données telles que la BDETM, le RMQS ou la BDSolU, on peut différencier une anomalie anthropique qui est une concentration inhabituelle « d'une substance dans un sol en lien avec les activités humaines ». Elle correspond à une pollution ponctuelle, éventuellement concentrée et localisée à la parcelle du site et aux parcelles avoisinantes concernées par la pollution. Une anomalie anthropique est reliée à une source émettrice identifiée (cuve fuyarde de station-service, cheminée de fonderie de plomb, dépôts de déchets, fuite de canalisation, déversement accidentel, stériles miniers, etc.). Certaines anomalies anthropiques peuvent être d'envergure, c'est-à-dire avoir une extension importante tant latéralement (XY) qu'en profondeur (Z), et peuvent atteindre le matériau parental, voire la nappe. Ainsi, dans le cas où une activité humaine (source émettrice) bien identifiée a contaminé une partie d'un territoire (industrie sidérurgique, incinérateur, mine, etc.), on parlera d'anomalie anthropique. Un travail de détermination de la qualité chimique des sols sera à mettre en place localement et à l'échelle de cette anomalie, en particulier pour la mise en évidence de gradients ou de zones concentrées afin d'évaluer les éventuelles incompatibilités d'usage en vue de proposer des modalités de gestion adaptées.

Ces bases apportent aussi des référentiels permettant la valorisation des terres excavées dans le respect des recommandations réglementaires et ministérielles. Celles-ci sont édictées dans le souci de la protection des milieux afin de préserver la santé des populations. En effet, les terres excavées peuvent être valorisées si la qualité des sols du site receveur est maintenue, si la qualité de la ressource en eau est conservée et les écosystèmes sont préservés ; et enfin si les caractéristiques chimiques des terres excavées sont compatibles sur le plan sanitaire avec l'usage futur du site receveur.

Pour répondre à ces objectifs, la démarche proposée par le ministère en charge de l'environnement (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2020) repose en première approche sur le respect de valeurs seuils, fixées pour l'ensemble du territoire, pour les éléments traces métalliques et certains composés organiques persistants ou non. Lorsque des teneurs de ces substances excèdent ces valeurs, elles doivent être comparées au fond pédo-géochimique local issu des bases de données régionales ou urbaines établies ou en cours d'élaboration dans certaines régions ou agglomérations. Enfin, dans le cas où une ou plusieurs teneurs en éléments traces métalliques et composés organiques persistants dépasseraient ces valeurs de fond pédo-géochimique, il conviendrait de réaliser une approche

au cas par cas pour cette ou ces substances (Ministère de la Transition Ecologique et solidaire, 2020).

On notera le rôle central des fonds pédo-géochimiques dans l'ensemble de la politique nationale de gestion des sites et des sols, qu'ils soient pollués ou non.

3.2 Calcul des seuils de cadmium dans les engrais phosphatés, en support à l'ANSES

L'Autorité européenne de sécurité des aliments (European Food Safety Authority, 2009, 2012) et l'Agence française de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) ont montré que le risque lié à la contamination des aliments par le cadmium ne peut être exclu en Europe et en France (Anses, 2011a, 2011b). Les résultats de l'étude Esteban menée par Santé Publique France montrent en effet que l'imprégnation en cadmium de la population française est d'une part parmi les plus élevées des pays occidentaux et d'autre part en augmentation comparativement aux campagnes précédentes (Santé Publique France, 2021). Les matières fertilisantes, et notamment les engrais phosphatés, sont l'une des principales sources anthropiques de contamination des sols et des chaînes alimentaires par cet élément. La mise en place d'un seuil de teneur en Cd dans les engrais est une des pistes qui pourrait permettre de limiter la contamination des sols et possiblement l'exposition des populations (Anses, 2019 ; Commission Européenne, 2016). Pour évaluer l'effet potentiel d'une modification des teneurs en Cd des engrais phosphatés sur les teneurs à long terme des sols en Cd, et a fortiori dans certains aliments (blé et pommes de terre), Carne *et al.* (2021) ont conduit des travaux utilisant une approche de bilan massique. Dans ce bilan simplifié, la voie principale d'exposition des populations considérée est le transfert du sol aux plantes puis leur ingestion (Figure 1). Le modèle utilisé intègre des apports en Cd aux sols par les dépôts atmosphériques, l'irrigation et les différents fertilisants organiques (boues, compost, effluents d'élevage) et inorganiques (engrais phosphatés). Afin d'étudier le potentiel effet d'une modification des teneurs en Cd des engrais phosphatés, différents scénarios de fertilisation ont été simulés sur une durée de 100 ans. Les sols cultivés du RMQS ont été utilisés comme données d'entrée, sur lesquelles ont été simulés les apports de Cd et les sorties par lixiviation et accumulation dans les plantes (blé et pommes de terre). Le transfert vers l'eau de ruissellement et les plantes est dépendant de certaines propriétés de sols comme le pH et le carbone (Römkens *et al.*, 2017 ; Six et Smolders, 2014) ; les calculs ont ainsi été faits en utilisant les mesures faites sur chaque site RMQS. Les nombreuses simulations (environ 10000) aboutissent à une distribution des teneurs en Cd possibles dans les sols en fonction des scénarios de fertilisation.

Dans le cas des scénarios de fertilisation du blé à 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ an⁻¹ présentés dans la figure 4, les concentrations de Cd les plus élevées dans les engrais (60 et 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹) entraînent une accumulation de Cd dans le sol tandis qu'une concentration en Cd à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ dans les engrais phosphatés stabiliserait l'accumulation du Cd dans les sols et pourrait permettre de limiter l'exposition possible des populations au Cd via l'ingestion de blé et pommes de terre. Ces résultats ont été publiés et sont disponibles en ligne, avec des travaux antérieurs conduits par Sterckeman *et al.* (2018) réalisés à partir de la BDETM, sur chaque région française.

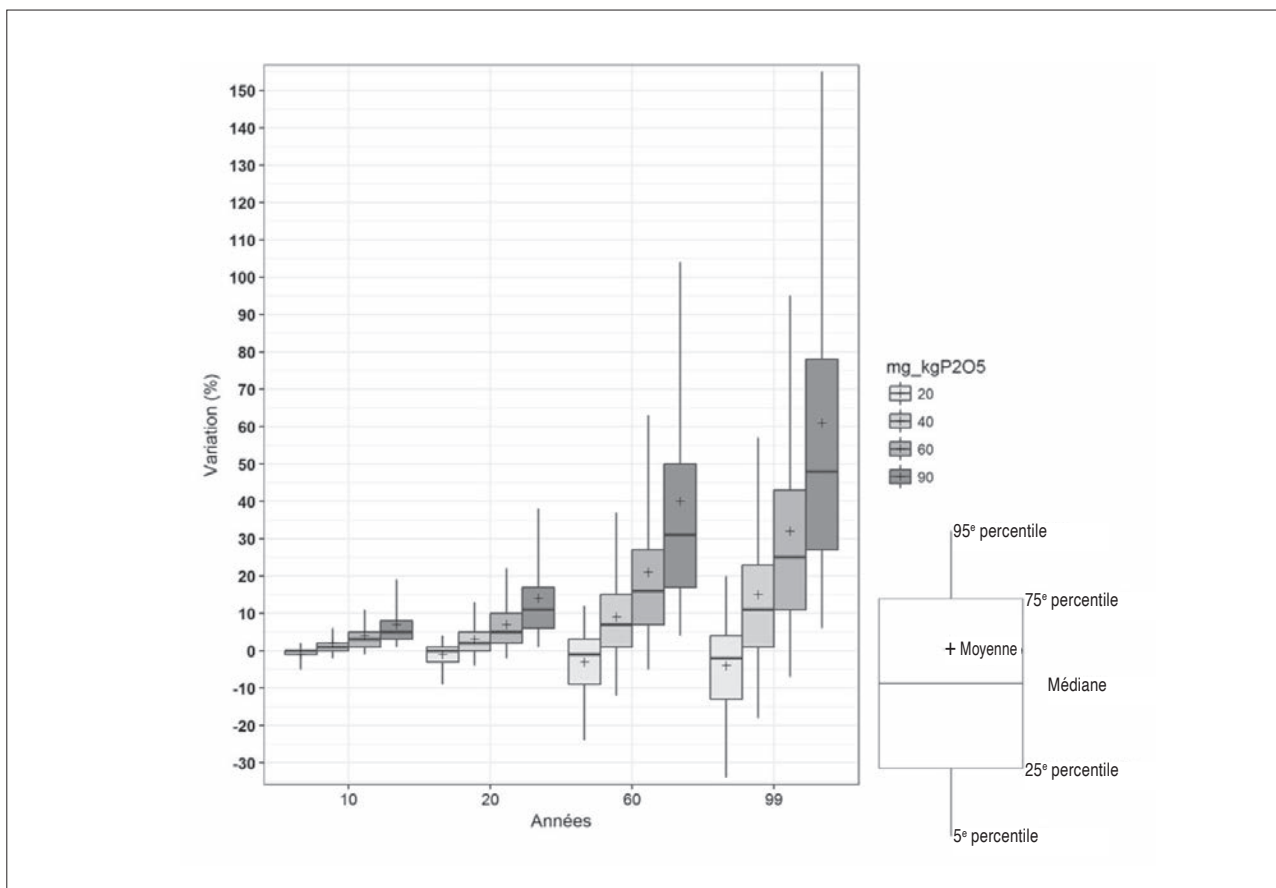
Si ces résultats ont permis à l'ANSES d'émettre des recommandations et arrêter une position nationale sur la question du Cd dans les engrais (Anses, 2019) plusieurs limites sont néanmoins à évoquer. En effet, dans ce travail, le choix a été fait de considérer une maximisation des apports de Cd pour les scénarios de fertilisation mais aussi pour les transferts vers les plantes. Les équations utilisées dans ce modèle font l'hypothèse que la biodisponibilité du Cd dans les sols avant et après ajout de fertilisants est identique, et fonction du pH, de la matière organique ou de l'argile (Carne *et al.*, 2021). Or la biodisponibilité du Cd présent dans les engrais dépend de la solubilité des fertilisants eux-mêmes, de la formation de précipités phosphatés (Grant, 2011), mais aussi d'autres facteurs tels que le Zn biodisponible ou la biomasse microbienne (Lambert *et al.*, 2007). Cependant, l'effet indirect des fertilisants sur le pH peut également entraîner une biodisponibilité accrue du Cd et son transfert dans les plantes (Grant, 2011).

Le calcul des risques pour la population dans l'étude de Carne *et al.* (2021) est également à nuancer puisque les augmentations simulées de Cd dans les sols ont été directement appliquées aux niveaux de Cd des aliments (blé et pomme de terre). Or, comme précédemment évoqué, l'augmentation des teneurs dans les sols ne prévaut pas forcément d'une augmentation dans les denrées alimentaires (McLaughlin et Zhao, 2020). Enfin, ne sont considérés ni l'exposition des populations au Cd par l'eau de boisson, ni l'élevage, qui pourraient être importants avec une lixiviation plus importante du Cd contenu dans les engrais vers les nappes.

Malgré les limites évoquées, le travail effectué par Carne *et al.* (2021) constitue un exemple de l'intérêt d'utiliser les bases de données sol du GIS Sol pour les scénarios prédictifs de contamination des sols et appuyer des décisions d'institutions publiques sur des questions de santé liées aux pratiques agricoles. Les nombreuses données disponibles, agronomiques mais aussi de pratiques culturelles permettent d'affiner les modèles et de les rendre les plus réalistes possibles, en utilisant une diversité de situations, en non pas seulement une donnée moyenne par exemple.

Figure 4 : Variation des concentrations de Cd dans la matrice sol (exprimée en pourcentage) en fonction du temps de projection (10, 20, 60 et 99 ans) par rapport à la première année d'application, basée sur la moyenne et les centiles (P05, P25, P50, P75, P95) de concentration en Cd dans le sol, selon le plan de fertilisation en monoculture de blé de 80 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ simulant une teneur en Cd constante de 90, 60, 40 et 20 mg Cd.kg $P_2O_5^{-1}$ dans l'engrais phosphaté sur une période de 99 ans. Figure issue du rapport d'expertise collective élaboré dans le cadre de l'avis de l'Anses n°2015-SA-0140 relatif à l'exposition au cadmium (Anses, 2018).

Figure 4 : Variation in Cd concentrations in soil (expressed as percentages) at 10, 20, 60 and 99 years compared with the first year of application, based on mean and percentiles (P05, P25, P50, P75, P95) of Cd concentration in soil according to the wheat monoculture fertilization plan of 80 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ simulating a constant Cd content of 90, 60, 40 and 20 mg Cd.kg $P_2O_5^{-1}$ in the phosphate fertilizer (Ph/80b/90, Ph/80b/60, Ph/80b/40 and Ph/80b/20 fertilization plans) over a 99-year period (Anses, 2018).



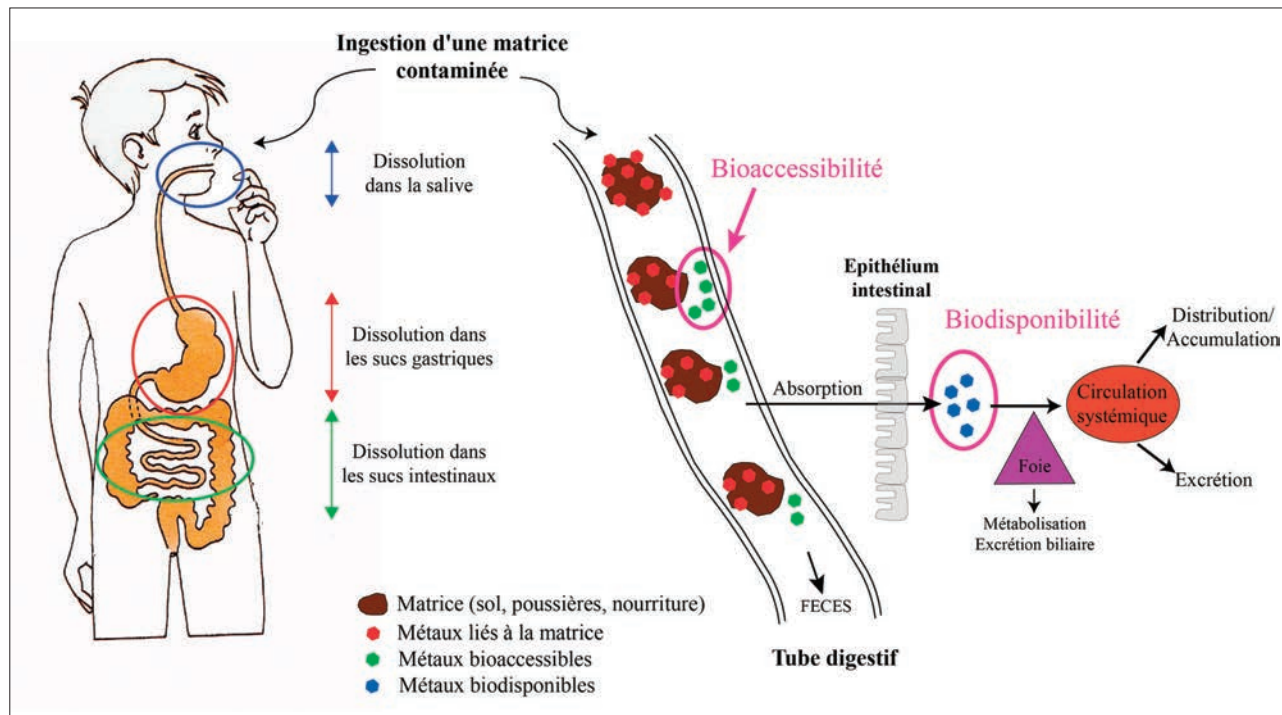
3.3 Arsenic bioaccessible des sols

En France, plus de 7000 sites et sols pollués ou potentiellement pollués en lien avec les activités industrielles passées ou actuelles sont recensés et appellent une action des pouvoirs publics à titre préventif ou curatif. Parmi les polluants le plus souvent impliqués se trouve l'arsenic. Une concentration élevée en As dans les sols peut également être d'origine géogène. Les populations vivant sur ces sols sont donc surexposées à ce métalloïde avec des conséquences multiples quant aux effets sur leur santé. Il est recommandé dans la Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués de considérer les sols dont la concentration en As inorganique est supérieure à 25 mg/kg comme des sources potentielles de surexposition à l'arsenic

de la population et donc un risque pour la santé (Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, 2017). Cette valeur constitue la limite supérieure des sols dit "ordinaires" dans le référentiel des concentrations couramment observées dans les sols présentant divers métaux et métalloïdes, constitué et publié par INRAE.

Les différents modes d'exposition directe de l'Homme aux polluants présents dans les sols incluent l'inhalation de poussières, l'absorption cutanée et l'ingestion de particules de sol et de poussières (Paustenbach, 2000, *Figure 1*). Néanmoins, dans le cas des polluants métalliques non volatils, l'ingestion de sol est la voie majeure de contamination, particulièrement chez les jeunes enfants du fait des comportements mains-bouche. L'évaluation des risques en lien avec cette voie

Figure 5 : Schématisation des notions de bioaccessibilité et biodisponibilité en cas d'ingestion d'une matrice contaminée (Pelfrène, 2016).
Figure 5 : Bioaccessibility and bioavailability of As after ingestion of a contaminated matrix (Pelfrène, 2016).



d'exposition reste un domaine qui est soumis à des incertitudes. Les pratiques courantes reposent encore très souvent sur la mesure des concentrations totales (ou pseudo-totales) en polluants dans les sols. Or, seule une fraction des polluants, la fraction biodisponible (Figure 5), est réellement assimilée par l'organisme et est susceptible d'induire un effet toxique. La détermination de la biodisponibilité orale des polluants nécessite la mise en place d'expérimentations *in vivo*. Pour des raisons d'éthique, de coûts et de temps associées à ces mesures, des tests *in vitro*, simulant les conditions physiologiques du système digestif, ont été développés pour évaluer la bioaccessibilité orale des polluants (Figure 5). Celle-ci correspond à la fraction soluble du polluant pouvant être libérée dans le tractus gastro-intestinal et susceptible d'atteindre la circulation sanguine (Paustenbach, 2000). L'intégration de la notion de bioaccessibilité (au lieu des concentrations totales) permet de réaliser de façon plus pertinente les évaluations de risques.

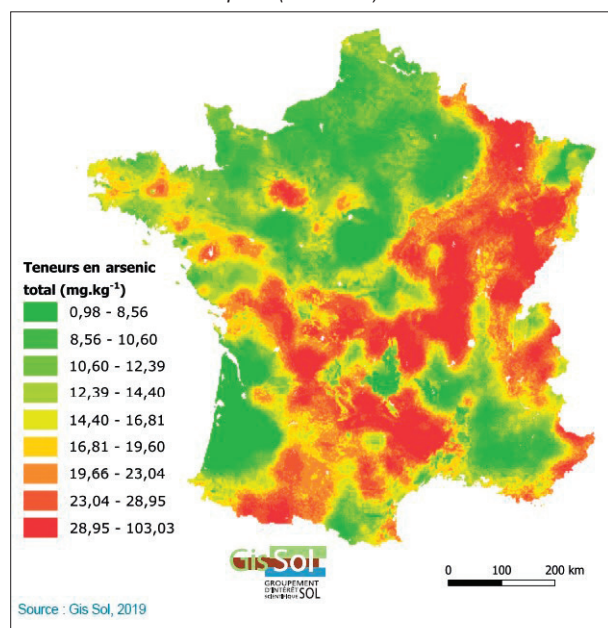
Parmi les tests *in vitro* développés, celui du groupe BARGE (the BioAccessability Research Group of Europe) est une méthode unifiée, reconnue et standardisée (the Unified Bioaccessibility Method, UBM; ISO 17924), dans laquelle la digestion se fait en deux étapes successives : une étape gastrique avec l'ajout de suc gastrique, d'un mélange d'enzymes et de sels pour simuler le jus gastrique, suivie d'une étape de neutralisation et d'une addition de plusieurs enzymes afin de représenter l'étape intestinale. Ce test, qui a été validé par rapport à un modèle animal (le porcelet)

pour As, Cd et Pb (Denys *et al.*, 2012), est utilisé dans de nombreuses études à l'échelle nationale et internationale, et est recommandé dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. Néanmoins, cette démarche, longue, coûteuse et qui requiert un "savoir-faire" compte tenu de sa complexité, n'est pas ou peu mise en œuvre à l'heure actuelle en France par les gestionnaires de sites et sols pollués et les bureaux d'études. Dans un objectif de meilleure prise en compte de l'exposition des populations, une méthode simplifiée au moyen d'acide chlorhydrique dilué (HCl 0,65 %) a été développée (Pelfrène *et al.*, 2020) permettant de prédire la bioaccessibilité orale des polluants (As, Cd et Pb) au niveau de l'estomac (phase gastrique) mais aussi en considérant l'ensemble du tube digestif (phase gastro-intestinale). La méthode d'analyse simplifiée à l'HCl est applicable sur des terres provenant de nombreux sites et dans différents contextes environnementaux, c'est-à-dire avec des origines de pollution, des caractéristiques physico-chimiques et des degrés de contamination en éléments métalliques et/ou organiques variés. Elle permet une démarche exploratoire et un tri des échantillons à moindre coût avant de valider l'analyse sur certains échantillons par la méthode normalisée UBM.

Plus spécifiquement sur l'arsenic, la Haute Autorité de Santé (HAS) a publié en février 2020 une recommandation de bonne pratique à l'intention des professionnels de santé pour le dépistage, la prise en charge et le suivi des populations résidant sur des sites et sols pollués ou à risque de pollution par ce

Figure 6 : Cartographie des teneurs prédites en arsenic total des horizons de surface (0-30 cm) des sols en France.

Figure 6 : Spatial distribution of predicted total As concentrations in topsoil (0 - 30 cm) in France.



métalloïde (Haute Autorité de Santé, 2020). Ainsi, lorsque la concentration en As bioaccessible dans le sol est supérieure à 25 mg/kg, la HAS recommande de dépister les populations les plus sensibles (jeunes enfants et femmes enceintes en particulier) et plus spécifiquement de constituer une base de données rassemblant et conservant tous les résultats des évaluations biométriologiques de l'exposition.

À ce jour, nous disposons uniquement de la carte des teneurs prédites en As total des horizons de surface des sols en France, basées sur les mesures des sites du RMQS (Figure 6).

Pour prendre en compte la recommandation de la HAS, un projet nommé BASR (Bioaccessibilité de l'arsenic dans les sols du RMQS), soutenu par l'ADEME et mené par JUNIA et INRAE Info&Sols, est en cours. L'objectif de cette étude est de réaliser une cartographie des valeurs en As bioaccessible, notamment sur les zones présentant les plus fortes concentrations. Plus spécifiquement, il s'agit de considérer les sols du RMQS présentant une concentration totale supérieure à 25 mg/kg en vue de déterminer l'arsenic bioaccessible. Au total, 353 échantillons de sols ont été identifiés dans la collection nationale du RMQS (première campagne) comme répondant à ce critère (Figure 7). Ils ont été répréparés pour analyse par le Conservatoire Européen des Échantillons de Sol (Ratié et al. 2010) et envoyés à JUNIA pour l'analyse de la bioaccessibilité.

À ces échantillons est associée une base de données renseignant sur leurs paramètres physico-chimiques (i.e. teneurs en argile, limons et sables, CEC, bases échangeables, pH, teneurs en

phosphore assimilable, calcaires totaux, carbone organique, azote total, matière organique et éléments majeurs) ainsi que leur degré de contamination en As. Au regard du nombre d'échantillons concernés ($n = 353$), il a été fait le choix d'utiliser le test simplifié à l'HCl pour prédire la bioaccessibilité orale (BA) de l'As dans les phases gastrique (G) et gastro-intestinale (GI) et ce, au moyen d'équations établies par Pelfrène et al. (2020) :

$$\log_{10}[\text{As}]_{\text{BA prédicté}_G} = 0,83 \times \log_{10}[\text{As}]_{\text{HCl}} + 0,16$$

$$\log_{10}[\text{As}]_{\text{BA prédicté}_{GI}} = 0,80 \times \log_{10}[\text{As}]_{\text{HCl}} + 0,13$$

Cette méthode d'extraction permet d'évaluer la bioaccessibilité orale de l'As pour une gamme de concentrations totales dans les sols allant de 2 à 2 600 mg/kg. Le test a été réalisé sur l'ensemble de la population de 353 échantillons. Les résultats sont présentés dans la figure 8, à savoir la distribution statistique des concentrations totales en As, des concentrations extraites au moyen du test simplifié et des concentrations bioaccessibles prédites dans les deux phases. Plus spécifiquement, les valeurs obtenues au moyen du test HCl ont été corrigées et utilisées dans les équations présentées précédemment en vue de prédire les concentrations bioaccessibles classiquement évaluées au moyen du test UBM.

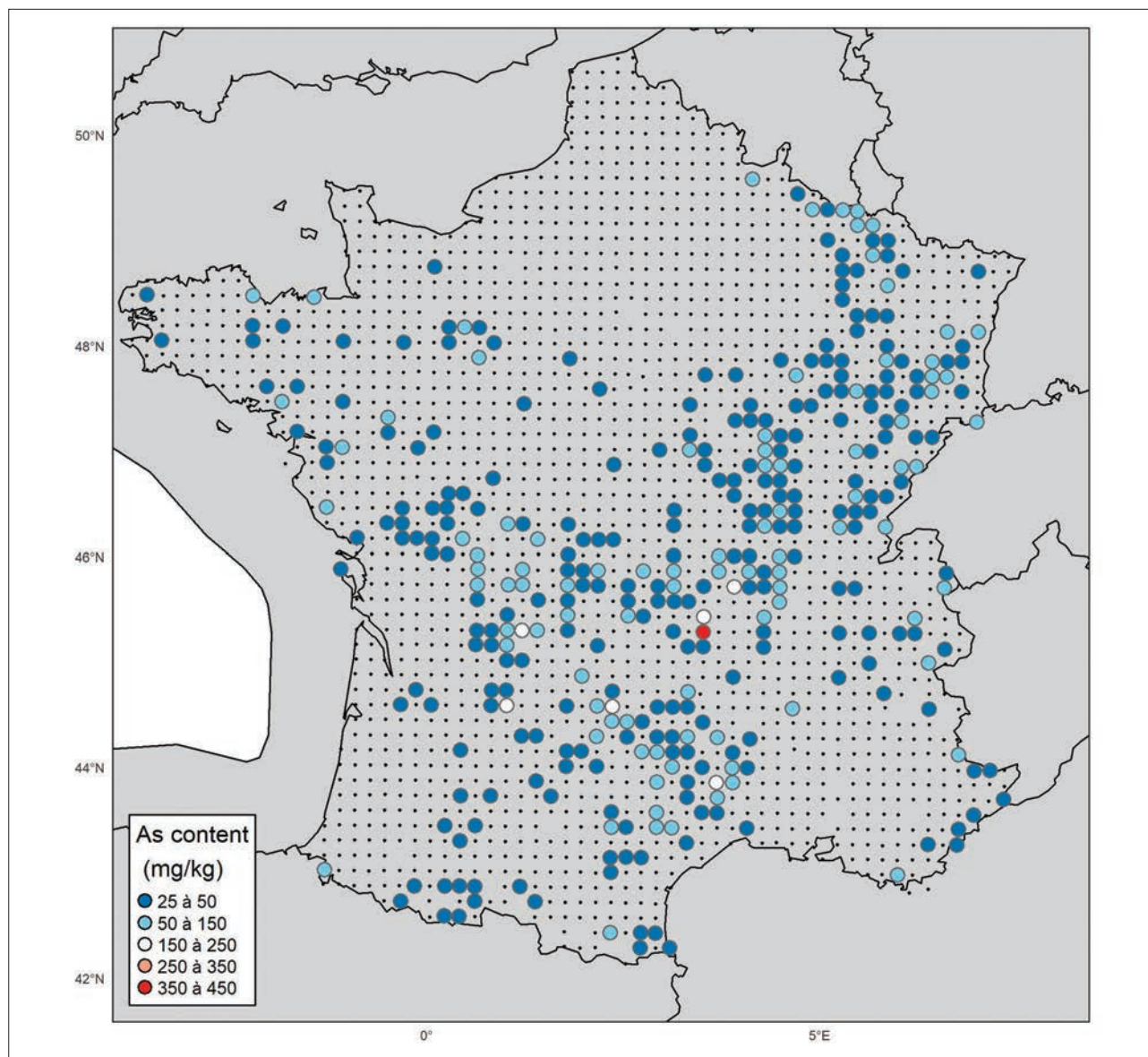
Les concentrations totales en As varient de 25 à 412 mg/kg, tandis que les concentrations extraites à l'HCl varient de 0,4 à 118 mg/kg. Après calcul, les concentrations bioaccessibles prédites varient de 0,7 à 76 mg/kg dans la phase G et de 0,7 à 61 mg/kg dans la phase GI. Il est à noter que seul un des sols étudiés présente une concentration en As bioaccessible prédite supérieure à 25 mg/kg ; pour les autres sols, la valeur seuil n'est pas dépassée. Exprimées en pourcentage par rapport aux concentrations totales, les concentrations extraites à l'HCl varient de 1,1 à 50 % (8 % en moyenne et 6 % en médiane). Les pourcentages d'As bioaccessible prédits varient quant à eux de 1,6 à 45 % dans la phase G (9 % en moyenne et 7 % en médiane) et de 1,5 à 39 % dans la phase GI (8 % en moyenne et 7 % en médiane).

Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de considérer la bioaccessibilité dans l'évaluation de l'exposition des populations. En effet, à l'exception d'un cas, les concentrations bioaccessibles prédites sont inférieures à la valeur seuil de 25 mg/kg. De plus, les pourcentages d'As bioaccessible sont relativement faibles (< 10 % en moyenne), montrant ainsi qu'une faible proportion d'As est solubilisée dans les fluides digestifs et donc potentiellement peu biodisponible également.

Dans la suite du projet, l'ensemble des données sera interprété par croisement avec les mesures disponibles sur les sites du RMQS afin de chercher d'éventuels déterminants de la bioaccessibilité. Une analyse spatiale sera réalisée afin de proposer une cartographie des teneurs prédites bioaccessibles de l'As. Ces données viendront ainsi alimenter les bases de données du Gis Sol dans lesquelles ne figurent actuellement que les concentrations en As total. L'information sur l'As

Figure 7 : Localisation des échantillons de sols dont les concentrations en As total sont supérieures à 25 mg.kg⁻¹.

Figure 7 : Location of soil samples presenting As concentrations above 25 mg.kg⁻¹.



bioaccessible permettra de mieux évaluer l'exposition des populations et *in fine* le risque.

3.4 Teneurs en HAP dans les sols et évaluation des risques sanitaires

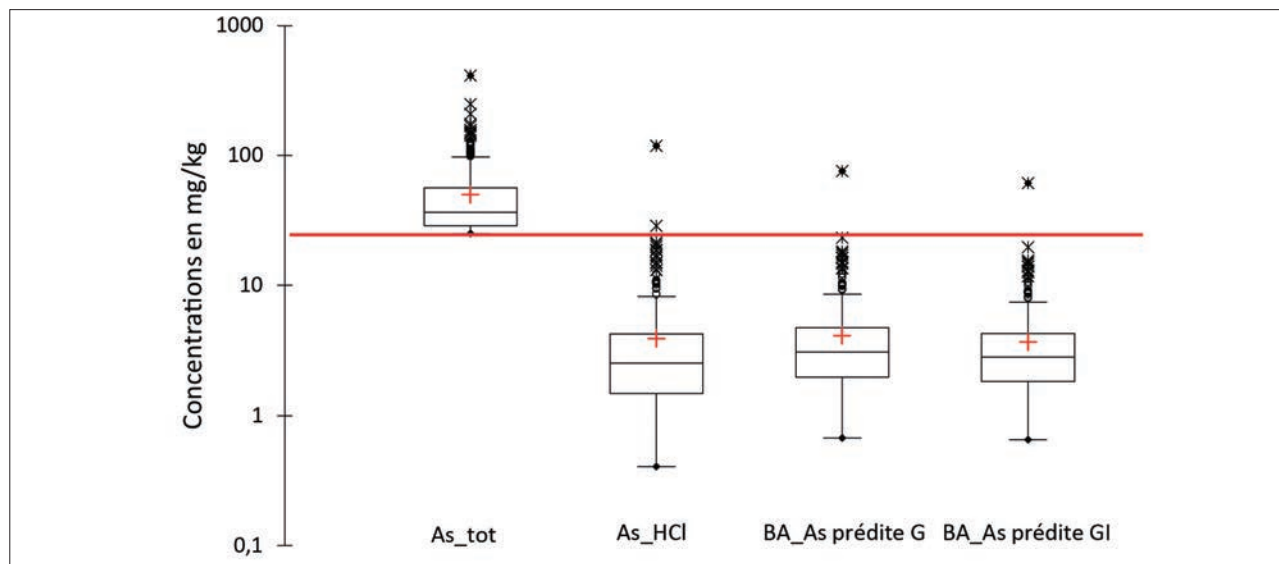
L'étude des hydrocarbures aromatiques polycycliques mesurés dans le cadre du RMQS publiée en 2021 (Froger *et al.*, 2021) représente un exemple de valorisation de ces données dans le domaine de la santé. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) forment une famille de composés organiques

constitués d'au moins deux cycles aromatiques ou benzéniques. Ils sont principalement formés lors de la pyrolyse de matière organique (combustibles fossiles, bois...) et, dans une moindre mesure, produits lors de la formation de combustibles fossiles (pétrole, charbon). Les activités anthropiques constituent la source majoritaire de HAP émis dans l'environnement (trafic routier, industrie minière et charbon, chauffage...).

Si plus de 2000 composés différents possédant 2 à 8 cycles peuvent être formés, seule une centaine a été identifiée (Shackelford et Keith, 1976). Seize HAP font l'objet d'un suivi particulier et ont été classés parmi les polluants organiques persistants (POP) qui se caractérisent par leur persistance,

Figure 8 : Distribution des concentrations en As (exprimées en mg.kg^{-1} , $n = 353$). As_tot : concentrations totales ; As_HCl : concentrations extraites au moyen du test simplifié ; BA_As prédite-G et BA_As prédite-GI : concentrations bioaccessibles prédites dans les phases G (gastrique) et GI (gastro-intestinale) ; tracé rouge : valeur seuil à 25 mg.kg^{-1} .

Figure 8 : Distribution of As concentrations (in mg.kg^{-1} , $n = 353$). As_tot : total concentrations ; As_HCl : extracted concentrations using simplified test ; BA_As prédite-GI : bioaccessible concentration predicted in gastric (G) and gastrointestinal (GI) phases. The red limit indicates the threshold value of 25 mg.kg^{-1} .



leur caractère bioaccumulable, leur toxicité et leur mobilité dans l'environnement (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019). Depuis les années 2000, leur suivi a été légiféré au niveau européen dans les milieux aquatiques (Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/EC) et dans l'air ambiant (2004/107/EC), mais aucune surveillance institutionnalisée n'a été mise en place pour les sols. Or les sols peuvent constituer à la fois un puits et une source de ces molécules dans l'environnement et il est donc essentiel d'évaluer le niveau de contamination des sols par les HAP.

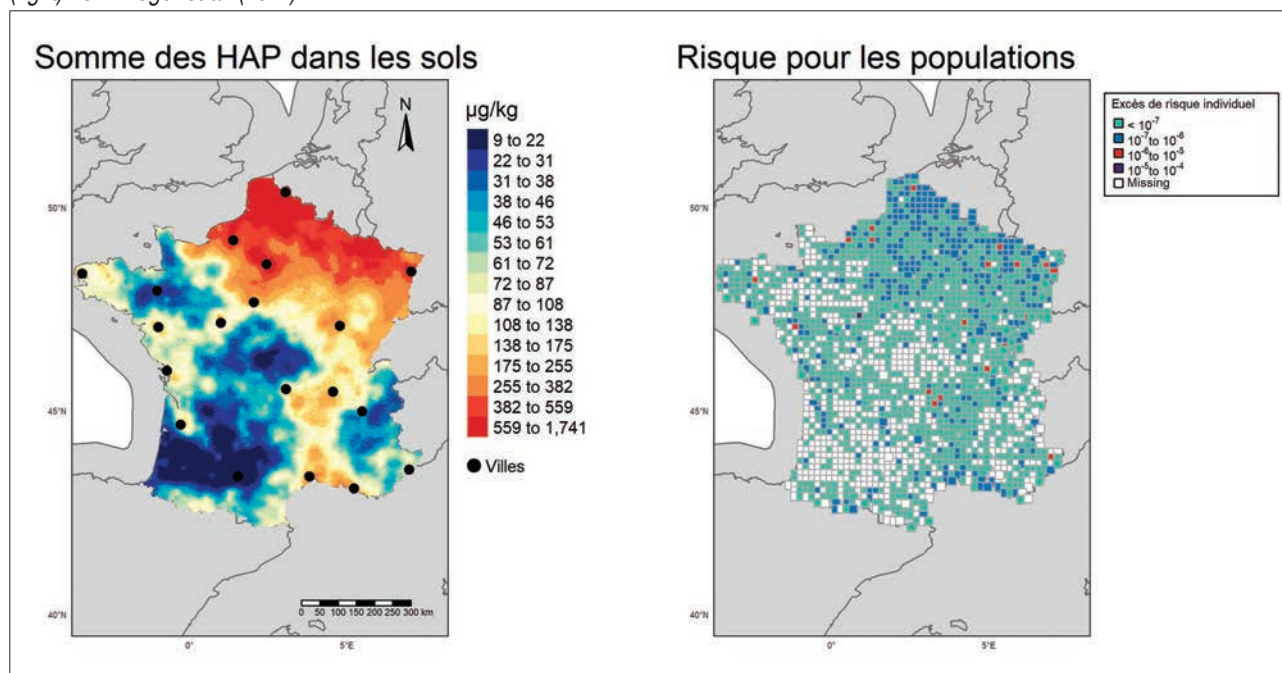
Dans ce contexte, 15 HAP ont été mesurés dans les sols de surface métropolitains échantillonnés lors de la première campagne du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) qui a eu lieu entre 2000 et 2008. Ils ont tout d'abord été valorisés dans le cadre d'un premier article (Villanneau *et al.*, 2013) exposant les premiers travaux de cartographie de quatre HAP. L'étude s'est poursuivie avec la publication d'un article traitant de la distribution spatiale des teneurs totales en HAP, leur origine et les risques sanitaires associés (Froger *et al.*, 2021), dont les résultats sont présentés ci-après. Les concentrations quantifiées pour la somme des 15 HAP ($\Sigma 15 \text{ HAP}$) varient de 5,1 à $31\,200 \mu\text{g kg}^{-1}$, avec une valeur médiane de $32,6 \mu\text{g kg}^{-1}$, et les HAP ont été détectés dans 70 % des échantillons de sol. Selon le référentiel d'interprétation de la contamination en HAP (Maliszewska-Kordybach, 1996), 83 % du territoire français correspondrait à des sols non contaminés mais près de 3 % des sites dépassent le seuil de forte contamination. La spatialisation des concentrations

de la somme des 15 HAP a été effectuée par une approche géostatistique non linéaire développée avec l'École des Mines ParisTech et démontre de fortes variations spatiales de la contamination des sols (Figure 9). Les concentrations les plus importantes sont observées dans les régions industrielles au Nord-Est et dans la vallée du Rhône et sous forme de gradients diffus et notamment autour des grandes agglomérations. L'étude des ratios de concentrations de certains HAP permet d'identifier les sources probables de contaminations. Ces ratios, comparés à des enregistrements des émissions historiques (Gabrieli *et al.*, 2010), suggèrent ainsi pour le Nord de la France une origine liée aux émissions industrielles importantes de 1950-1950, en particulier par l'industrie du charbon et la métallurgie.

Une évaluation des risques a été conduite en considérant les voies d'exposition directe (ingestion de sol, inhalation de particules, absorption cutanée) afin d'estimer le risque maximal potentiel induit par les HAP présents dans les sols français pour les populations locales. L'absence de consensus des études sur la biodisponibilité des HAP dans les sols en fonction des voies de transfert (Ruby *et al.*, 2016) justifie l'utilisation des concentrations totales en HAP pour une évaluation maximisant les risques potentiels. L'excès de risque individuel (ERI) pour une exposition chronique ainsi calculé, et correspond au risque de contracter un cancer au cours de sa vie, lié à l'exposition aux HAP présents dans les sols (Total Lifetime Cancer Risk). L'excès de risque est considéré comme négligeable en dessous de 10-6 c'est-à-dire une probabilité qu'une personne sur un million soit

Figure 9 : Distribution spatiale de la somme des 15 HAP dans les sols en $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (à gauche) et évaluation des risques pour les résidents (à droite) d'après Froger *et al.* (2021).

Figure 9 : Spatial distribution of the sum of 15 PAH in French soils in $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (left) and risk assessment results for residential population (right) from Froger *et al.* (2021).



atteinte d'un cancer du fait de la contamination. Ce calcul a abouti à une valeur médiane de $1,07 \times 10^{-8}$ pour le risque total de cancer au cours de la vie, avec 20 sites (0,9 % de la totalité des sites) au-dessus de la limite de 10^{-6} et un au-dessus de la limite de 10^{-5} , limite usuellement retenue par les autorités françaises pour la gestion des sites pollués. Ces résultats démontrent l'existence d'un risque, certes faible, mais non nul, qu'il faut prendre en compte et intégrer dans le cadre des évaluations des risques. De plus, le transfert vers les plantes et les denrées alimentaires n'a pas été pris en compte dans le cadre de ce travail mais constitue une voie supplémentaire d'exposition. Enfin, la présence d'une multitude de substances dans les sols pose la question des effets cocktails et de leur impact sur la santé humaine et les écosystèmes.

3.5 Exemples d'un dispositif d'évaluation des inégalités environnementales de santé

La notion d'inégalité environnementale, introduite en France dans les années 2000, interroge notamment les liens entre « environnement et santé ». Il s'agit ainsi des inégalités relatives à des cultures et à des groupes sociaux dans leur exposition à des risques, à des pollutions et à des nuisances. Il a été ainsi avancé que les groupes socio-économiquement défavorisés

sont souvent à la fois plus exposés à des nuisances et à des pollutions environnementales et plus vulnérables aux effets sanitaires qui en résultent (WHO, 2019). En France, l'exigence de justice environnementale a été renforcée dès 2005 par la Charte de l'environnement et des actions ont été conduites dans le cadre des Plans Nationaux Santé Environnement (PNSE) avec la volonté de mise en place d'outil pour identifier et gérer les zones géographiques pour lesquelles on observe une surexposition à des substances toxiques.

Dans ce contexte, l'INERIS a piloté des programmes de recherche pour construire un outil d'aide à la décision, la Plateforme intégrée pour l'Analyse des INégalités Environnementales d'exposition - PLAINE (Caudeville *et al.*, 2012), qui permet d'interfacer le modèle d'exposition multimedia MODUL'ERS dans un système d'information géographique (SIG). PLAINE est capable d'évaluer et de représenter les expositions des populations à l'échelle régionale grâce à l'intégration de données de différentes natures et notamment celles relatives à la pollution des sols. Des techniques d'analyse spatiale sont développées pour traiter les bases de données d'entrée et les rendre pertinentes en vue des objectifs de caractérisation de l'exposition.

Un premier essai d'adaptation des données en ETM des sols avait été construit avec la base de données BDETM (Caudeville *et al.*, 2017). Plus récemment, PLAINE a intégré les données

ETM et HAP issues de la base de données RMQS (Loannidou *et al.*, 2018). Ainsi, pour l'ensemble des polluants ETM, la classe d'âge des 2 à 7 ans est systématiquement la plus à risque. Les voies d'exposition prépondérantes correspondent, selon les régions, à l'ingestion d'eau de consommation et de sol (pour le plomb), de fruits et légumes (pour le cadmium) et à l'inhalation (pour le nickel). L'importance des comportements d'autoconsommation, comme facteur d'exposition à un polluant, a été mise en évidence (Ineris, 2014).

Dans le cadre d'un stage de master 2 en 2021, les nouvelles données spatialisées des HAP dans les sols (*cf. section 3.4*) ont été intégrées au modèle PLAINE pour poursuivre les travaux de Loannidou *et al.* (2018). Dans ces travaux, seules les teneurs en benzo(a)pyrène avaient été intégrées au modèle. Cependant, la distribution spatiale du BaP seul ne mettait pas en évidence le gradient Nord-Sud ni le couloir rhodanien que l'on observe pour la somme des HAP (*Figure 9*). De plus, le nombre de valeurs inférieures à la limite de détection pour le BaP rendait la spatialisation difficile et la carte obtenue montrait alors une large majorité des teneurs dans les sols proches de zéro. Les risques totaux obtenus étaient alors influencés majoritairement par les teneurs en HAP dans l'air et les HAP dans les sols n'avaient que peu d'influence. Les risques finaux calculés intégrant la somme des HAP sous la forme d'un équivalent toxique présentent une nouvelle distribution spatiale fortement influencée par celle des sols avec un risque plus important au nord de la France.

Tous ces travaux justifient ainsi l'intérêt de collecter des données de contamination des sols à l'échelle nationale afin d'évaluer les risques sanitaires pour les populations et les inégalités environnementales. Enfin, ces résultats pourraient permettre aux acteurs nationaux et régionaux de mettre en place des politiques différenciées en fonction du contexte : sensibilisation des populations, prévention des risques, formation des personnels soignants et acteurs de la santé publique, sensibilisation des acteurs de l'aménagement du territoire et de l'agriculture. Ces problématiques locales doivent être considérées dans la mise en place d'une agriculture locale par exemple.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les bases de données sur la qualité des sols mises en place par le GIS Sol ont permis la capitalisation d'une multitude d'informations et leur stockage de manière sécurisée a permis leur diffusion à la fois dans le cadre de travaux de recherche mais aussi pour un public plus large (ex : projets locaux d'aménagement). Dans le cadre des politiques publiques de santé, ces bases de données sont essentielles pour évaluer les risques induits par les contaminants dans les sols, en particulier les éléments traces métalliques ou les polluants organiques persistants, que ce soit dans les sols agricoles (RMQS, BDETM) ou les milieux urbains (BDSolU). Les différents exemples

évoqués exposent la diversité des applications possibles et l'intérêt d'utiliser les bases de données de qualité des sols pour traiter des notions de risques pour l'homme et les écosystèmes et croiser les champs de compétences (aménagement du territoire, épidémiologie). Cependant, la complexité du comportement des contaminants dans l'environnement et de leur transfert nécessite la connaissance des limites inhérentes à ces données sur les sols et les évaluations des risques qui en découlent. En effet, la notion de biodisponibilité des éléments est à prendre en considération pour éviter une surestimation des risques. Des analyses d'extractibilité des ETM peuvent constituer un moyen de se rapprocher de la fraction biodisponible, tout comme l'utilisation d'équations de pédo-transfert mais les incertitudes liées à ces estimations doivent être clairement établies. L'utilisation de ces données doit être faite au regard des avancées scientifiques et des connaissances sur la relation entre contamination des sols et santé humaine. Elles permettent néanmoins des approches prospectives à l'échelle nationale indispensables aux réflexions des politiques publiques.

Dans des contextes de gestion du territoire, ces bases de données sur les sols apportent également une vision globale et mutualisée de la qualité des sols et peuvent être considérées comme des références pour la France. Ainsi, par exemple, dans le cadre des études de l'impact des activités potentiellement polluantes (en fonctionnement ou historique) sur leur environnement en vue d'identifier les situations où des actions de remédiation sont nécessaires, les bases de données développées s'avèrent très précieuses, offrant des informations de qualité, accessibles et impartiales. Elles sont aussi pertinentes pour orienter finement les terres excavées vers des sites où elles seront valorisées, en particulier au cours des grands projets d'aménagement où les enjeux sanitaires et environnementaux, mais aussi économiques, sont importants. Dans un monde subissant des changements globaux, les sols sont au cœur des enjeux planétaires notamment de la sécurité alimentaire, de l'atténuation du changement climatique, de la préservation de la biodiversité ou de la santé humaine. Les connaissances et la préservation des sols sont ainsi indispensables dans la mise en place d'une gestion globale de la santé, liant santé des écosystèmes et santé humaine, avancée par le concept « One Health ».

Les bases de données sur les sols vont alors prendre une place centrale dans la capitalisation et l'acquisition de nouvelles données sur les polluants « émergents » (microplastiques, PFAS, pesticides, médicaments...), tout en s'adaptant aux innovations des techniques analytiques et des technologies numériques (interopérabilité des données). Cependant, la connaissance de l'existence de ces données par les acteurs de la santé est encore peu répandue. Des projets valorisant la mise à disposition de données environnementales pour les acteurs de la santé comme le Green Data for Health (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2022) mais aussi des projets

de recherche multi-acteurs sur l'exposome sont essentiels pour mieux comprendre les relations sol-santé, prévenir et gérer les risques, actuels et futurs.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR (2018). Qualité du sol - Recommandations pour la détermination des valeurs de fond NF EN ISO 19258, Septembre 2018.
- Adriano D.C. (2001). Trace Elements in Terrestrial Environments : Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. 867.
- Anses (2019). Avis et rapports de l'ANSES relatifs à l'exposition au cadmium (CAS n°7440 -43-9).
- Anses (2018). Exposition au cadmium. Propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales d'expertise collective. Rapport d'expertise collective. Saisine 2015-SA-0140. 291.
- Anses (2017). Exposition des consommateurs des Antilles au chlordécone, résultats de l'étude Kannari.
- Anses (2011a). Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) Tome 1 - Contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques persistants, mycotoxines et phyto-estrogènes. Anses, Agence Nationale de sécurité Sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du Travail. 2006-SA-03, 346.
- Anses (2011b). Avis ANSES relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'homme. Saisine n°2011-SA-0194.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Ratié C., Saby N., Grolleau E. (2003). Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Etude Gest. des Sols, Assoc. Française pour l'Etude des Sols 10, 241-250.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N.P.A., Grolleau E. (2002). A New Initiative in France: A Multi-Institutional Soil Quality Monitoring Network. Comptes Rendus l'Académie d'Agriculture Fr. 88, 93-103.
- Belbèze S., Djemil M., Béranger S., Stochetti A. (2019). Détermination de FPG - Fonds Pédogéochimiques Anthropisés urbains. Agglomération pilote : TOULOUSE METROPOLE. Rapport final. BRGM/RP-69502-FR.
- Brevik E.C., Sauer T.J. (2015). The past, present, and future of soils and human health studies. SOIL 1, 35-46. <https://doi.org/10.5194/soil-1-35-2015>
- BRGM (2022a). Site internet BDSol [WWW Document]. URL <http://www.bdsol.fr/>
- BRGM (2022b). Site internet Terres Excavées InfoTerre [WWW Document].
- Brunet J., Branchu P., Eychène C., Belbèze S., Guyonnet D. (2023). L'offre du GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain. Etude et Gestion des Sols. Vol. 30. Pages 195-206. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/02/EGS_2023_30_Brunet_195-206.pdf
- Brus D.J. (2014). Statistical sampling approaches for soil monitoring. Eur. J. Soil Sci. 65, 779-791. <https://doi.org/10.1111/ejss.12176>
- Brus D.J., Saby N.P.A. (2016). Approximating the variance of estimated means for systematic random sampling, illustrated with data of the French Soil Monitoring Network. Geoderma 279, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.016>
- Carne G., Leconte S., Sirot V., Breyse N., Badot P.M., Bispo A., Deportes I.Z., Dumat C., Rivière G., Crépét 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. Sci. Total Environ. 760, 143374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143374>
- Caudeville J., Bonnard R., Boudet C., Denys S., Govaert G., Cicoletta A. (2012). Development of a spatial stochastic multimedia exposure model to assess population exposure at a regional scale. Sci. Total Environ. 432, 297-308. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.06.001>
- Caudeville J., Ioannidou D., Boulvert E., Bonnard R. (2017). Évaluation des risques cumulatifs en Lorraine : un cadre de travail pour caractériser les inégalités environnementales. Rapp. Sci. INERIS 2016-2017, 42-43.
- Commission Européenne (2016). Règlement du Parlement Européen et du Conseil établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants porteurs du marquage CE et modifiant les règlements (CE) n° 1069/2009 et (CE) n° 1107/2009.
- Coussy S., Dubrac N., Rouvreau L. (2020). Guide de caractérisation des terres excavées dans le cadre de leur valorisation hors site dans des projets d'aménagement et en technique routière pour des projets d'infrastructure linéaire de transport - Cas des terres excavées issues de sites et sols pot.
- CRIGE (2014). BD Ocsol PACA Base de données régionale d'occupation des sols <https://www.criges-paca.org/projets/bd-ocsol-paca/>
- Denys S., Caboche J., Tack K., Rychen G., Wragg J., Cave M., Jondreville C., Feidt C. (2012). *In vivo* validation of the Unified Barge Method to assess the bioaccessibility of arsenic, antimony, cadmium, and lead in soils. Environ. Sci. Technol. 45, 6252-6260.
- Deslais, W., Baize, D., 1997. Étude des éléments traces dans les sols agricoles français. Un programme ADEME/INRA. Journées Techniques, Juin 1997, Paris, France
- Dor F., Denys S., Daniau C., Bellenfant G., Zeghnoun K., Dabin C., Nedellec V., Mosqueron L., Floch-Barneaud A., Mathieu A. (2009). Exposition des enfants par ingestion de sol et de poussières contaminées : quels choix pour les évaluations de risque ?, in: Rencontres Nationales de La Recherche Sur Les Sites et Sols Pollués, Oct 2009, Paris, France.
- Droissart-Long A. (2017). Caractérisation de l'état des milieux sols, eaux et végétaux dans l'environnement des installations industrielles - Utilisation de l'Environnement local témoin (No. INERIS-DRC-15-151883-01265 B).
- European Environment Agency (1995). Corine Land Cover [WWW Document]. URL <https://www.eea.europa.eu/publications/COROLandcover>
- European Food Safety Authority, E., (2009). Cadmium in food - Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. EFSA J. 7. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.980>
- European Food Safety Authority E. (2012). Cadmium dietary exposure in the European population. EFSA J. 10, 2551. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2551>
- Eychène C. (2019). Communication dans le cadre du projet GeoBaPa conduit par Soltracing., in: Soltracing.
- Froger C., Saby N.P.A., Jolivet C.C., Boulonne L., Caria G., Freulon X., De Fouquet C., Roussel H., Marot F., Bispo A. (2021). Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. Soil 7, 161-178. <https://doi.org/10.5194/soil-7-161-2021>
- Gabrieli J., Vallenga P., Cozzi G., Gabrieli P., Gambaro A., Sigl M., Decet F., Schwikowski M., Gäggeler H., Boutron C., Cescon P., Barbante C. (2010). Post 17th-century changes of european pah emissions recorded in high-altitude alpine snow and ice. Environ. Sci. Technol. 44, 3260-3266. <https://doi.org/10.1021/es903365s>
- Gevao B., Semple K.T., Jones K.C. (2000). Bound pesticide residues in soils: a review. Environ. Pollut. 108, 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00197-9)
- Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L. (2011). Sols et environnement. Dunod.
- Grand Paris Express (2022). Société du Grand Paris [WWW Document]. URL <https://www.societedugrandparis.fr/>
- Grant C. (2011). Influence of phosphate fertilizer on cadmium in agricultural soils and crops. Pedologist 54, 143-155.
- Haute Autorité de Santé (2020). Dépistage, prise en charge et suivi des personnes potentiellement surexposées à l'arsenic inorganique du fait de leur lieu de résidence - Méthode Recommandations pour la pratique clinique.
- Ineris (2014). Les inégalités environnementales sur les territoires 44.
- INRAE (2020). One Health, une seule santé pour la Terre, les animaux et les Hommes.
- INSEE (2021). Nomenclature d'activités française [WWW Document]. URL <https://www.insee.fr/fr/information/2406147>
- Ioannidou D., Malherbe L., Beauchamp M., Saby N.P.A., Bonnard R., Caudeville J. (2018). Characterization of environmental health inequalities due to polycyclic aromatic hydrocarbon exposure in France. Int. J. Environ. Res. Public Health 15. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122680>

- ISO 17924 (2019). Soil quality — Assessment of human exposure from ingestion of soil and soil material — Procedure for the estimation of the human bioaccessibility/bioavailability of metals in soil.
- Jolivet C., Almeida-Falcon J.-L., Berché P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehmann S., Maître B., Ratié C., Schellenberger E., Soler-Dominguez N. (2018). Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine, 2016 - 2027, Version 3, INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France.
- Lambert R., Grant C., Sauvé S. (2007). Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers. *Sci. Total Environ.* 378, 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.008>
- Légifrance (2014). LOI n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové [WWW Document]. URL <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000028772256/>
- Maliszewska-Kordybach B. (1996). Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination. *Appl. Geochemistry* 11, 121-127. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00076-3)
- McLaughlin M.J., Zhao F. (2020). Managing cadmium in agricultural systems. *Adv. Agron.* <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.10.004>
- Meersmans J., Martin M.P., De Ridder F., Lacarce E., Wetterlind J., De Baets S., Le Bas C., Louis B.P., Orton T.G., Bispo A., Arrouays D. (2012). A novel soil organic C model using climate, soil type and management data at the national scale in France. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 873-888. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0085-x>
- Ministère de l'économie et des finances (2022). Fonds pour le recyclage des friches [WWW Document]. URL <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/mesures/fonds-recyclage-friches>
- Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer (2017). Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués.
- Ministère de la Santé et de la Prévention (2022). Deuxième plan national Santé-environnement (PNSE2) - 2009 - 2013 [WWW Document]. URL <https://solidarites-sante.gouv.fr/ministere/documentation-et-publications-officielles/rapports/sante/article/deuxieme-plan-national-sante-environnement-pnse2-2009-2013>
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2022a). Démarche établissements sensibles [WWW Document]. URL <http://ssp-infoterre.brgm.fr/page/demarche-etablissements-sensibles>
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2022b). Diagnostic du site [WWW Document]. URL <http://ssp-infoterre.brgm.fr/diagnostic-site>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire (2022). Green Data for Health [WWW Document]. URL <https://gd4h.ecologie.gouv.fr/>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Guides de valorisation hors site des terres excavées dans des projets d'aménagement. [WWW Document]. URL <http://ssp-infoterre.brgm.fr/guide-valorisation-hors-site-terres-excavees>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire (2019). Les polluants organiques persistants (POP) [WWW Document]. URL <https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/polluants-organiques-persistants-pop> (accessed 11.28.19).
- Paustenbach D.J. (2000). The practice of exposure assessment: a state-of-the-art review. *J. Toxicol. Environ. Health. B. Crit. Rev.* 3, 179-291. <https://doi.org/10.1080/10937400050045264>
- Pelfrène, A., (2016). Bioaccessibilité des polluants métalliques: Apport à l'évaluation de l'exposition des populations vivant sur des sites contaminés. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Lille - Sciences et Technologies, 154.
- Pelfrène A., Sahmer K., Waterlot C., Glorennec P., Douay F., Le Bot B. (2020). Evaluation of single-extraction methods to estimate the oral bioaccessibility of metal(loid)s in soils. *Sci. Total Environ.* 727, 138553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138553>
- Phillips L.J., Moya J. (2014). Exposure factors resources: Contrasting EPA's exposure factors handbook with international sources. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 24, 233-243.
- Ratié C., Richer-de-Forges A., 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), p. 263-273, 2010. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/10/EGS_17_3_EGS_17_3_4_web_Ratie.pdf
- Römkens P., De Vries W., Kros H. (2017). Dynamic Cadmium balances in arable soils and grassland soils in the EU: impact of revision of fertiliser regulation on accumulation rates and levels of Cd in soils - preliminary results as of June 14, 2017. *Wageningen Environ. Res.*
- Ruby M. V., Lowney Y.W., Bunge A.L., Roberts S.M., Gomez-Eyles J.L., Ghosh U., Kissel J.C., Tomlinson P., Menzie C. (2016). Oral Bioavailability, Bioaccessibility, and Dermal Absorption of PAHs from Soil - State of the Science. *Environ. Sci. Technol.* 50, 2151-2164. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04110>
- Saby N., Bertouy B., Boulonne L., Bispo A., Ratié C., Jolivet C. (2020). Statistiques sommaires issues du RMQS sur les données agronomiques et en éléments traces des sols français de 0 à 50 cm. <https://doi.org/doi:10.15454/BNCXYB>
- Saby N., Bertouy B., Boulonne L., Toutain B., Caria G., Jolivet C. (2019). Summary statistics of Permanent Organic Pollutants concentration in French topsoils. <https://doi.org/doi:10.15454/LQVMNN>
- Saby N., Villanneau E., Toutain B., Arrouays D.A. (2018). Seuils de détection d'anomalies pour une série d'éléments traces métalliques (RMQS). <https://doi.org/doi:10.15454/UEZXYB>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.03.001>
- SANDRE (2022). Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau [WWW Document]. URL <https://www.sandre.eaufrance.fr/>
- Santé Publique France (2021). Imprégnation de la population française par le cadmium. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016.
- Semple K.T., Morris A.W.J., Paton G.I. (2003). Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis. *Eur. J. Soil Sci.* 54, 809-818. <https://doi.org/10.1046/j.1351-0754.2003.0564.x>
- Shackelford W.M., Keith L.H. (1976). Frequency of Organic Compounds Identified in Water. Washington DC.
- Six L., Smolders E. (2014). Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Sci. Total Environ.* 485-486, 319-328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.109>
- Soltracing (2022). Le projet GeoBaPa [WWW Document]. URL <https://soltracing.fr/geobapa>
- Sterckeman T., Gossiaux L., Guimont S., Sirguey C., Lin Z. (2018). Cadmium mass balance in French soils under annual crops: Scenarios for the next century. *Sci. Total Environ.* 639, 1440-1452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.225>
- Villanneau E., Saby N., Jolivet C., Marot F., Maton D., Floch-Barneaud A., Antoni V., Arrouays D. (2008). Détection de valeurs anormales d'éléments traces métalliques dans les sols à l'aide du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols. *Etude et Gestion des Sols* 15, 183-202.
- Villanneau E.J., Saby N.P.A., Orton T.G., Jolivet C.C., Boulonne L., Caria G., Barriuso E., Bispo A., Briand O., Arrouays D. (2013). First evidence of large-scale PAH trends in French soils. *Environ. Chem. Lett.* 11, 99-104. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0401-y>
- WHO (2019). Environmental Health Inequalities in Europe. Second assessment report., Copenhagen, WHO Regional Office for Europe.
- Yoon H., Yoo S.-K., Seo J., Kim T., Kim P., Kim P.-J., Park J., Heo J., Yang W. (2020). Development of General Exposure Factors for Risk Assessment in Korean Children. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061988>

Vers une stratégie du GIS Sol pour la connaissance et la protection de la biodiversité des sols

C. Imbert^(1*), M. Valé⁽²⁾, A. Lévêque⁽³⁾, C. Jolivet⁽¹⁾ et A. Bispo⁽¹⁾

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

2) AUREA AGROSCIENCES, 45160 Ardon, France

3) UMS PatriNat (OFB-CNRS-MNHN), 75005 Paris, France

* Auteur correspondant : cimbert@hotmail.fr

RÉSUMÉ

Nous dépendons tous des fonctions assurées par la biodiversité et notamment par celle présente dans les sols. Le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) s'engage pleinement dans la connaissance de la biodiversité, sa protection et dans la gestion durable des sols. En effet, le GIS Sol soutient depuis plus de 15 ans des programmes portant sur la biodiversité, notamment en association avec le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Nous présentons ici les suivis de biodiversité du RMQS, le programme d'investissement d'avenir Agro-Eco-Sol et les plans d'actions nationaux pour la préservation du Pélóbate brun (*Pelobates fuscus*) et du grand hamster d'Alsace (*Cricetus cricetus*). Nous proposons de compléter la stratégie de surveillance des sols français en y incluant des suivis standardisés de leur biodiversité. En effet, celle-ci n'est intégrée que de manière partielle dans les suivis de qualité des sols français, alors qu'elle en est une composante essentielle.

Mots-clés

Habitat, donnée pédologique, programme d'inventaire, programme de surveillance, espèce menacée, bioindicateur, biodiversité terrestre, biodiversité des sols

Comment citer cet article :

Imbert C., Valé M., Lévêque A., Jolivet C. et Bispo A., 2024 - Vers une stratégie du GIS Sol pour la connaissance et la protection de la biodiversité des sols *Étude et Gestion des Sols*, 31, 31-42

SUMMARY**TOWARDS A GIS SOL STRATEGY FOR THE UNDERSTANDING AND THE PROTECTION OF SOIL BIODIVERSITY**

We all depend on the functions provided by biodiversity, particularly by that found in the soil. The Soil scientific Interest Group (GIS Sol) is fully committed in the understanding and the protection of biodiversity and sustainable soil management. The GIS Sol supports biodiversity programs for over 15 years, in particular related to the French soil quality monitoring network (RMQS). Here we introduce the RMQS-Biodiversity monitoring programs, the Agro-Eco Sol Investments for the Future program and the national action plans for the preservation of the Brown Pelobate (*Pelobates fuscus*) and the European Hamster (*Cricetus cricetus*). Through them, we propose to complete the French soil monitoring strategy by including a standardized monitoring of soil biodiversity. Biodiversity is only partially integrated into soil quality monitoring, even though it is an essential component.

Key-words

Habitat, soil data, monitoring programs, inventory programs, endangered specy, terrestrial biodiversity, soil biodiversity.

RESUMEN**HACIA UNA ESTRATEGIA DEL GIS SOL PARA EL CONOCIMIENTO Y LA PROTECCIÓN DE LA BIODIVERSIDAD DE LOS SUELOS**

Todos dependemos de las funciones que desempeña la biodiversidad y, en particular, de la que se encuentra en el suelo. El Grupo de Interés Científico Suelos (GIS Sol) se compromete plenamente en el conocimiento de la biodiversidad, su protección y en la gestión sostenible de los suelos. En efecto, el GIS Sol apoya desde hace más de 15 años programas relativos a la biodiversidad, en particular en asociación con la Red de Mediciones de la Calidad de los Suelos (RMQS). Presentamos aquí los seguimientos de biodiversidad del RMQS, el programa de inversión de futuro Agro-Eco-Sol y los planes de acciones nacionales para la conservación del sapo de espuelas pardo (*Pelobates fuscus*) y del gran hámster de Alsacia (*Cricetus cricetus*). Proponemos completar la estrategia de vigilancia de los suelos de Francia incluyendo un seguimiento estandarizado de su biodiversidad. En efecto, ésta sólo se integra de manera parcial en los controles de calidad de los suelos franceses, cuando es un componente esencial de los mismos.

Palabras clave

Hábitats, datos pedológicos, programas de inventario, programas de vigilancia, especies amenazadas, bioindicadores, biodiversidad terrestre, biodiversidad de los suelos.

1. INTRODUCTION

Le sol, longtemps invisibilisé, se trouve aujourd'hui à l'ordre du jour des agendas politiques. Notamment, la protection des sols est citée dans le Pacte vert au niveau européen (Montanarella, 2020) et dans le plan Biodiversité du gouvernement français (<https://www.ecologie.gouv.fr/plan-biodiversite>). La proposition de directive sur la santé des sols met en avant la surveillance des sols, à travers la mesure régulière de paramètres physico-chimiques et biologiques, notamment pour suivre l'effet des politiques publiques sur l'état des sols (Direction Générale de l'Environnement, 2023 ; Köninger *et al.*, 2022).

L'un des freins à la mise en œuvre effective de ces politiques est la méconnaissance de la biodiversité des sols.

La biodiversité des sols comprend l'ensemble des organismes vivant dans le sol et les fonctions qu'ils assurent (FAO, 2020). Les organismes du sol sont généralement classés selon leur taille dans cinq catégories : les microorganismes, la microfaune, la mésofaune, la macrofaune et la mégafaune. Les microorganismes regroupent les organismes unicellulaires tels que les bactéries, les archées, les champignons et les autres protistes. La microfaune correspond aux organismes pluricellulaires invisibles à l'œil nu dont les nématodes. La mésofaune regroupe les organismes visibles à l'œil nu, de moins de 2 mm tels que les collemboles ou les acariens. Tous les invertébrés de plus de 2 mm font partie de la macrofaune et les vertébrés forment la mégafaune (Decaëns, 2010). Ces organismes assurent les fonctions du sol dont nous dépendons tous pour notre alimentation et notre santé, pour la régulation du climat et de la ressource en eau (Pulleman *et al.*, 2012 ; van der Putten *et al.*, 2023).

Malgré cette importance, la biodiversité des sols reste méconnue (FAO, 2020). À titre d'exemples, moins d'un quart des espèces de bactéries, d'archées, de nématodes, de collemboles et de vers de terre seraient décrites (Geisen *et al.*, 2019). Peu d'études sur la biodiversité des sols ont été mises en œuvre par rapport au nombre d'études sur des taxons emblématiques comme les oiseaux ou les mammifères (Troudet *et al.*, 2017). Au sein des sciences du sol, la biodiversité est aussi bien moins étudiée que d'autres grandes thématiques liées au sol (Mason *et al.*, 2022).

L'intensification de l'utilisation et la gestion des terres, le changement climatique, la pollution dégradent les sols et menacent la biodiversité terrestre en général et celle des sols en particulier (IPBES, 2019 ; Orgiazzi *et al.*, 2016). Cependant, la plupart des politiques actuelles en matière de protection des sols manquent d'une vision holistique, considérant encore trop peu la biodiversité des sols (Direction Générale de l'Environnement, 2023 ; Köninger *et al.*, 2022). L'utilisation d'indicateurs biologiques de la qualité des sols est entravée par le manque de référentiels pour interpréter leurs valeurs (Krüger *et al.*, 2018).

Par ailleurs, les propriétés des sols sont également prises en compte dans les politiques visant la protection de la biodiversité de surface. Celle-ci, à l'instar de la biodiversité souterraine, entretient un lien étroit avec les sols. L'un des exemples les plus documentés est celui des plantes (Reeve *et al.*, 2016). La distribution des vertébrés terrestres peut être également influencée par les caractéristiques des sols, les sols pouvant constituer un abri ou un milieu de vie pour de nombreux animaux (FAO, 2020).

Avec comme objectif l'inventaire et la surveillance des sols français, le GIS Sol s'est engagé depuis plus de 15 ans dans ces enjeux en lien avec la biodiversité et notamment en intégrant des suivis de la biodiversité des sols dans ses programmes. Dans cet article, nous présentons l'engagement du GIS Sol dans la connaissance et la protection de la biodiversité des sols et proposons une stratégie pour la suite de ces travaux, s'appuyant sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS).

2. RENFORCER LA CONNAISSANCE DE LA BIODIVERSITÉ DES SOLS EN INTÉGRANT UNE COMPOSANTE BIOLOGIQUE AU RMQS (2018-2023)

Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) est un programme national de surveillance des sols lancé en 2000 (Jolivet *et al.*, 2018). Il couvre une partie du territoire français (l'ensemble de la métropole, les Antilles, la bande côtière guyanaise, la Réunion et Mayotte). Chaque année, environ 180 sites d'étude sont échantillonnés avec la volonté de les échantillonner tous les 10 à 15 ans (Jolivet *et al.*, 2018). Actuellement, le RMQS fournit essentiellement des données sur les aspects physiques et chimiques des sols. Une force majeure du RMQS est également son réseau d'acteurs comprenant les 12 équipes de terrain réalisant les échantillonnages annuels, l'équipe de coordination d'Info&Sols, les financeurs et les utilisateurs de données (chercheurs et décideurs).

Le réseau alimente une base de données inédite sur les caractéristiques physico-chimiques de sols de France, leurs contaminants et les pratiques agricoles. Plusieurs programmes passés ont permis de collecter également des informations sur la biodiversité des sols. Imbert *et al.* (2021) ont recensé ces travaux qui concernaient différents groupes biologiques et la répartition des prélèvements (Tableau 1).

Cette synthèse met en évidence que seuls les microorganismes et les activités enzymatiques sont suivis de manière systématique, avec une couverture nationale. Si d'autres groupes biologiques du sol et de surface ont été suivis, c'était à titre d'essai, pour des programmes temporaires. Cependant, ces exercices ont montré que le RMQS pourrait être le support

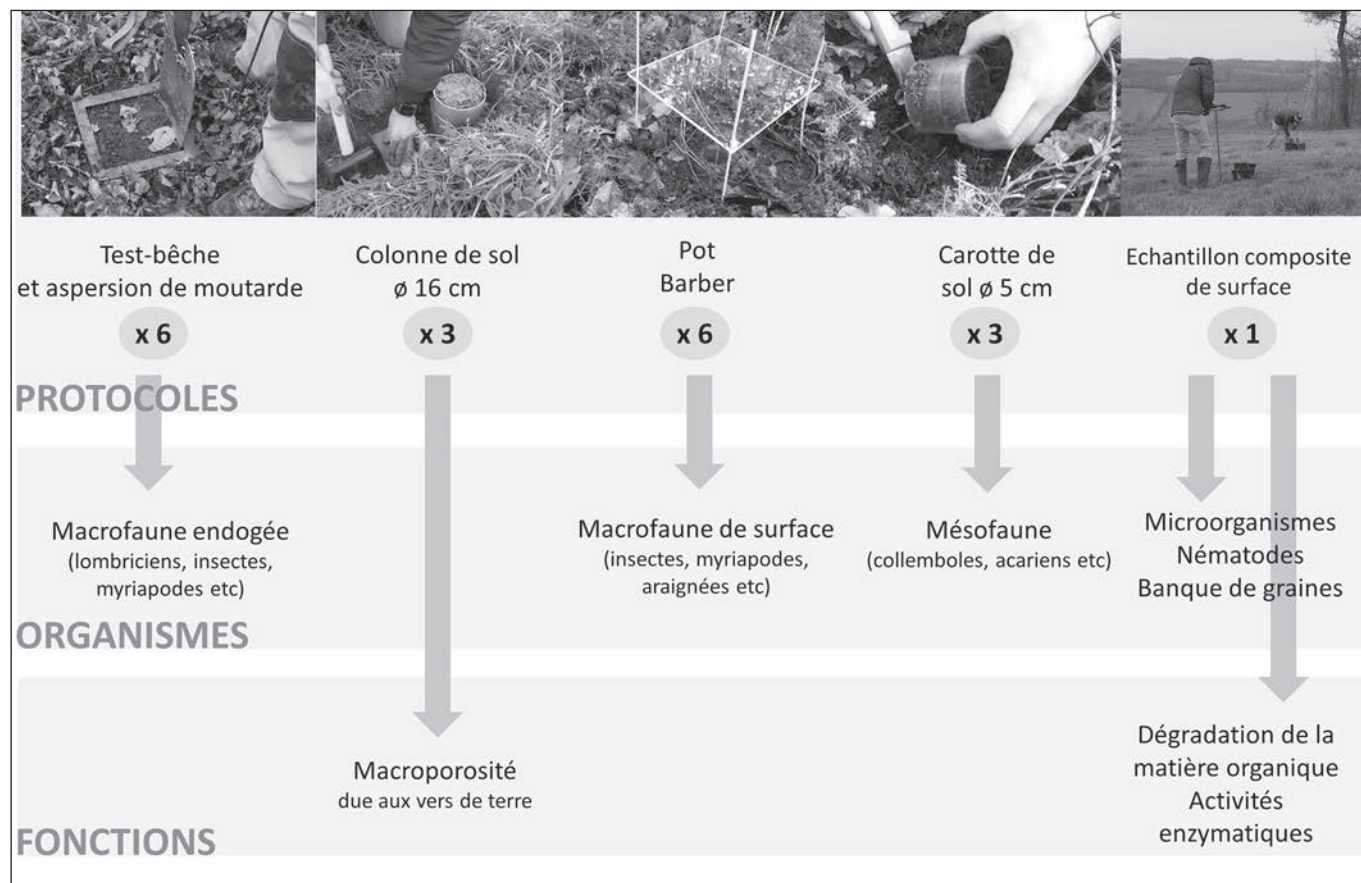
Tableau 1 : Le RMQS comme support à la connaissance de la biodiversité des sols depuis 2006 (issu de Imbert et al., 2021).**Table 1** : The RMQS as a support for the understanding of soil biodiversity since 2006 (from Imbert et al., 2021).

Programme	Assemblages biologiques	Méthodologie	Localisation	Période (Campagne RMQS*)	Résultats
ECOMIC-RMQS	Microorganismes	Echantillon composite de sol	France métropolitaine	Depuis 2006 (RMQS1 et 2)	Biogéographie Impact des modes d'usage Description des habitats
RMQS-Biodiv Bretagne	Vers de terre, nématodes, microarthropodes (collemboles, acariens) microorganismes, macrofaune endogée, dégradation de la matière organique	Echantillon de sol Carotte Test-bêche Sac de litière	Bretagne	2006-2007 (RMQS1)	Distribution Lien avec les pratiques agricoles (fertilisation, travail du sol et utilisation de pesticides)
GéoTruffe	Truffes (<i>Tuber magnatum</i> , <i>T. brumale</i> , <i>T. aestivum</i> , <i>T. melanosporum</i> et <i>T. indicum</i>)	Echantillon composite de sol	Sites dont les caractéristiques pédologiques et environnementales sont propices aux truffes (France métropolitaine)	2017-2018 (RMQS2)	Amélioration de la connaissance de l'autoécologie et de la distribution des truffes en France
Floris	Flore des prairies permanentes de montagne	Relevés botaniques	Prairies du Massif Central	2017-2018 (RMQS1)	Effet des pratiques agricoles sur les communautés de flore des prairies permanentes
Activités enzymatiques	Activités enzymatiques Respiration cellulaire	Echantillon composite de sol	France métropolitaine	Depuis 2016 (RMQS2)	Analyses en cours, Création de référentiels
Phase de test du RMQS-Biodiversité	Bactéries, champignons et archées, Protistes, Nématodes, Mésofaune endogée Macrofaune endogée, Mésofaune de surface, Macrofaune de surface, Activité enzymatique, Porosité du sol, Dégradation de la matière organique, en discussion : Flore et Fonge	Echantillon composite de sol Carottes de sol Pots Barber Test-bêche et application de moutarde	Phase de test : 30 sites répartis sur l'ensemble de la France métropolitaine	2020-2023 (RMQS2)	Résultats biologiques disponibles fin 2023

de travaux nationaux d'ampleur pour suivre la biodiversité des sols et plus largement certains groupes terrestres (flore et fonge par exemple). Avec l'objectif d'établir un programme de surveillance pérenne de la biodiversité des sols, des discussions ont commencé en 2018 avec un groupe d'experts et se poursuivent, avec le soutien de l'Office Français de la Biodiversité (OFB). Une campagne de prélèvement « test » a été menée, visant à évaluer la faisabilité et les coûts (ex : besoins humains, logistiques et financiers) de la mise en place d'un volet biodiversité, adossé au RMQS.

Dans le cadre de la phase de test, nous avons consulté un groupe d'experts sur la biodiversité des sols afin qu'ils nous conseillent sur les protocoles à utiliser. Cinq protocoles d'échantillonnage ont été choisis :

- l'échantillon composite de surface pour suivre les microorganismes (bactéries, archées, champignons et autres protistes), les nématodes, la banque de graines, la dégradation de la matière organique et des activités enzymatiques ;
- les pièges Barber pour la macrofaune de surface (principalement les insectes et les araignées) ;
- les carottes de sol pour suivre la mésofaune endogée (comme les collemboles ou les acariens) ;

Figure 1 : Organismes et fonctions suivis avec les protocoles du RMQS-Biodiversité.**Figure 1 :** Organisms and functions assessed with RMQS-Biodiversity protocols.

- les colonnes de sol pour suivre la macroporosité d'origine biologique ;

- le test-bêche suivi de l'application de moutarde pour la macrofaune endogée et notamment les vers de terre.

Ces protocoles ont été choisis pour avoir une vision globale et standardisée possible des organismes du sol et des fonctions ainsi que des mesures de la flore, (Figure 1).

Les protocoles de suivis de la biodiversité ont été effectués par les équipes de terrain du RMQS. Celles-ci ont été épaulées et formées sur le terrain par les agents d'INRAE. Trente sites du RMQS ont été échantillonnés (Tableau 2).

Dix laboratoires partenaires sont également impliqués dans l'analyse des échantillons (Figure 2). Ils sont aussi en charge de leur conservation.

Le retour d'expérience de cette campagne test démontre que :

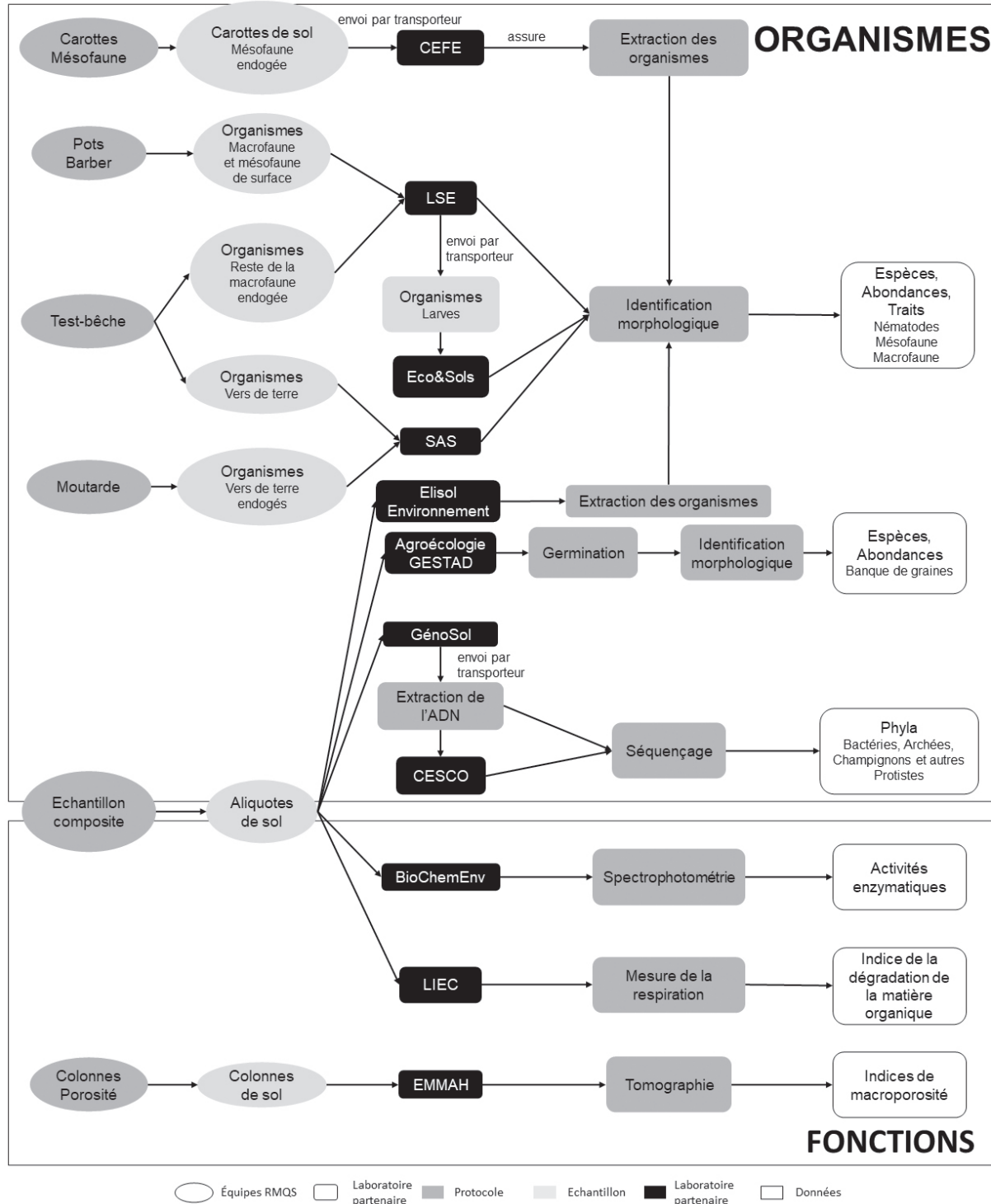
- les données acquises, avec l'appui d'équipes formées, sont de bonne qualité. Elles permettent d'ores et déjà de calculer une grande diversité de métriques pour caractériser la biodiversité, s'appuyant notamment aussi bien sur les taxons que sur les traits pour la faune du sol. La grande majorité des données

Tableau 2 : Nombre de sites échantillonnés selon l'usage du sol.**Table 2 :** Number of sampled sites according land use.

Usage du sol	Nombre de sites échantillonnés
Forêts et bois	8
Grandes cultures	7
Prairies permanentes	7
Milieux naturels	3
Friches	2
Parcs et jardins	1
Vergers	1
Vignes	1

Figure 2 : Parcours des échantillons depuis le terrain jusqu'aux données finales (CEFE : Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, LSE : Laboratoire Sol et Environnement, SAS : Sol, Agro et hydrosystème, Spatialisation, GESTAD : Gestion Durable des Adventices, CESCO : Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation, LIEC : Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, EMMAH : Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes).

Figure 2: Sample flow from field to final data (CEFE: Centre of Functional and Evolutive Ecology, LSE: Laboratory Soil and Environment, SAS: Soil, Agro and hydrosystems, Spatialization, GESTAD: Sustainable Management of Weeds Gestion Durable des Adventices, CESCO: Center of Ecology and Conservation Science, LIEC: Interdisciplinary Laboratory of Continental Environments, EMMAH: Mediterranean Environment and Agro-Hydrosystem Modelling).



acquises correspond aux attendus des chercheurs spécialistes impliqués ;

- la logistique proposée, sollicitant un transporteur pour la livraison des échantillons, s'est montrée efficace car peu d'échantillons ont été perdus ou sont arrivés après les délais imposés ;

- les échantillonnages pour la méso et la macrofaune doivent se faire au printemps, de février à avril, qui correspond à la période de l'année la plus favorable pour la biodiversité des sols (abondances et richesse taxonomique les plus élevées, Kaspari *et al.*, 2023). Échantillonner ces groupes à d'autres périodes conduirait à une perte de temps sachant que ces prélèvements sont chronophages et possiblement éprouvants physiquement (notamment du fait d'une position statique prolongée) ;

- le coût complet estimé, comprenant l'échantillonnage avec les équipes partenaires du RMQS et de l'analyse des échantillons pour la mesure de la biodiversité avec les équipes partenaires du RMQS et de la mesure de la biodiversité, serait de 5 338 € pour un site. Ce coût pourrait être réduit au fur et à mesure des années car les équipes du RMQS gagnant en expérience effectueraient plus rapidement les protocoles.

Compte tenu de ces enseignements, et notamment de la contrainte d'échantillonnage au printemps, différents scénarios ont été proposés car les 12 équipes partenaires du RMQS ne sont pas en mesure d'échantillonner tous les sites sur ce créneau. Trois variantes de plus ont été proposées. Parmi elles, deux impliquent des équipes dédiées réalisant les échantillonnages biologiques ce qui nécessiterait plusieurs passages et une coordination plus complexe par rapport à celle

du RMQS sous sa forme actuelle. Cinq laboratoires partenaires se sont proposés pour prendre en charge l'échantillonnage sur le terrain. Ces équipes seraient donc familières des protocoles de suivi de la biodiversité des sols.

Les quatre scénarios présentent des configurations variant selon le nombre d'équipes impliquées et le nombre de sites échantillonnés (*Tableau 3*). Les coûts des scénarios varient entre 240 000 et 580 000 euros par an avec un nombre de sites échantillonnés variable. Or, les analyses pouvant être effectuées découlent du nombre de sites échantillonnés. Avec moins de 100 sites échantillonnés par an (scénario 1), il serait possible d'établir année après année un référentiel de valeurs de biodiversité mais il sera impossible d'effectuer des analyses spatiales. Échantillonner 100 sites (scénario 3) par an permettra en plus d'établir des cartes de répartition de la biodiversité en fin de campagne (en 2027). Suivre la biodiversité sur l'ensemble des sites du RMQS permettra en plus d'observer l'évolution année après année des aires de répartition des taxons.

Il est donc complètement possible d'adosser au RMQS un volet biodiversité. La mise en place des différents protocoles fournirait ainsi des données sur quasiment l'ensemble des organismes des sols et sur trois fonctions (la porosité du sol due aux vers de terre, la dégradation de la matière organique et les activités enzymatiques).

Les données alors collectées permettraient d'obtenir une photographie de la biodiversité des sols en France, d'établir les évolutions spatio-temporelles de la biodiversité des sols et d'identifier les liens entre la biodiversité, la physico-chimie du sol, les activités humaines et leurs impacts.

Tableau 3 : Caractéristiques des quatre scénarios proposés.

Table 3 : Characteristics of the four proposed scenarios.

Scénario	Equipe en charge : Pots Barber Test-bêche Moutarde Carottes Mésofaune Colonnes Porosité	Equipe Echantillon composite	Nombre de sites échantillonnés par an	Analyses possibles	Coût par an (en euros)	Coût pour la fin de la campagne (4 ans, en euros)
1	Equipe RMQS	Equipe RMQS	45	Référentiel, Approche multi-taxon, Pas de carte de répartition	240 210	960 840
2	Equipe RMQS- Biodiversité	Equipe RMQS- Biodiversité	180	Référentiel, Approche multi-taxon, Cartes de répartition chaque année	581 940	2 327 360
3	Equipe RMQS- Biodiversité	Equipe RMQS- Biodiversité	100	Référentiel, Approche multi-taxon, une carte de répartition en fin de campagne	323 300	1 293 200
4	Equipe RMQS- Biodiversité	Equipe RMQS	180	Référentiel Cartes de répartition chaque année Approche multi-taxon moins robuste car tous les suivis de biodiversité ne seront pas effectués à la même date	581 940	2 327 360

En fonction de l'ambition décidée, les données générées serviraient à cartographier la répartition des espèces sur le territoire national et/ou à établir des référentiels pour les bioindicateurs de la qualité des sols.

Ce volet biodiversité du RMQS permettrait de compléter le programme de suivi de la biodiversité terrestre, orchestré par l'Office Français de la Biodiversité (OFB) qui, concernant le sol, portait uniquement sur les microorganismes et les activités enzymatiques (Touroult *et al.*, 2017). Les données obtenues constitueraient un référentiel sur la biodiversité des sols en France. Celui-ci pourrait être utilisé par les entreprises de conseil pour interpréter les valeurs obtenues et à terme contribuerait à développer cette filière commerciale de mesure et de conseil en biodiversité.

Par ailleurs, la base de données reste à construire. Elle devra être interopérable avec les bases de données nationales (SINP <https://sinp.naturefrance.fr/>) et internationales (comme Edaphobase, Burkhardt *et al.*, 2014).

En ce qui concerne d'autres groupes terrestres comme les champignons ou la flore des discussions ont été menées afin de les relier également au RMQS. Pour les champignons, il est proposé de tester une surveillance des sporophores de champignons conjointement sur les réseaux RMQS et RENECOFOR. Ce test profiterait des enseignements du suivi des champignons effectué depuis plus de 10 ans sur les placettes forestières de RENECOFOR et compléterait les connaissances dans les milieux ouverts grâce à l'échantillonnage des sites RMQS. Des associations mycologiques, réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain sont prêtes à effectuer ces inventaires. Ce projet est en cours de validation par le groupe de travail. De plus, l'inventaire des sporophores compléterait le suivi des champignons par séquençage, déjà effectué dans le cadre du RMQS.

La flore est quant à elle un groupe très bien documenté. Des données sur la flore des sites RMQS seraient cependant nécessaires pour expliquer les occurrences des organismes du sol. La difficulté de ce suivi est qu'il nécessite de très bonnes compétences en botanique. Pour cela, des discussions avec les membres des conservatoires nationaux, disposant d'un réseau de botanistes sur l'ensemble de la France, se poursuivent mais n'ont pas encore débouché sur des pistes de collaboration.

3. FOURNIR DES DONNÉES AUX ACTEURS ÉCONOMIQUES POUR PROPOSER DES RÉFÉRENTIELS POUR L'ANALYSE ET LE CONSEIL EN AGROÉCOLOGIE

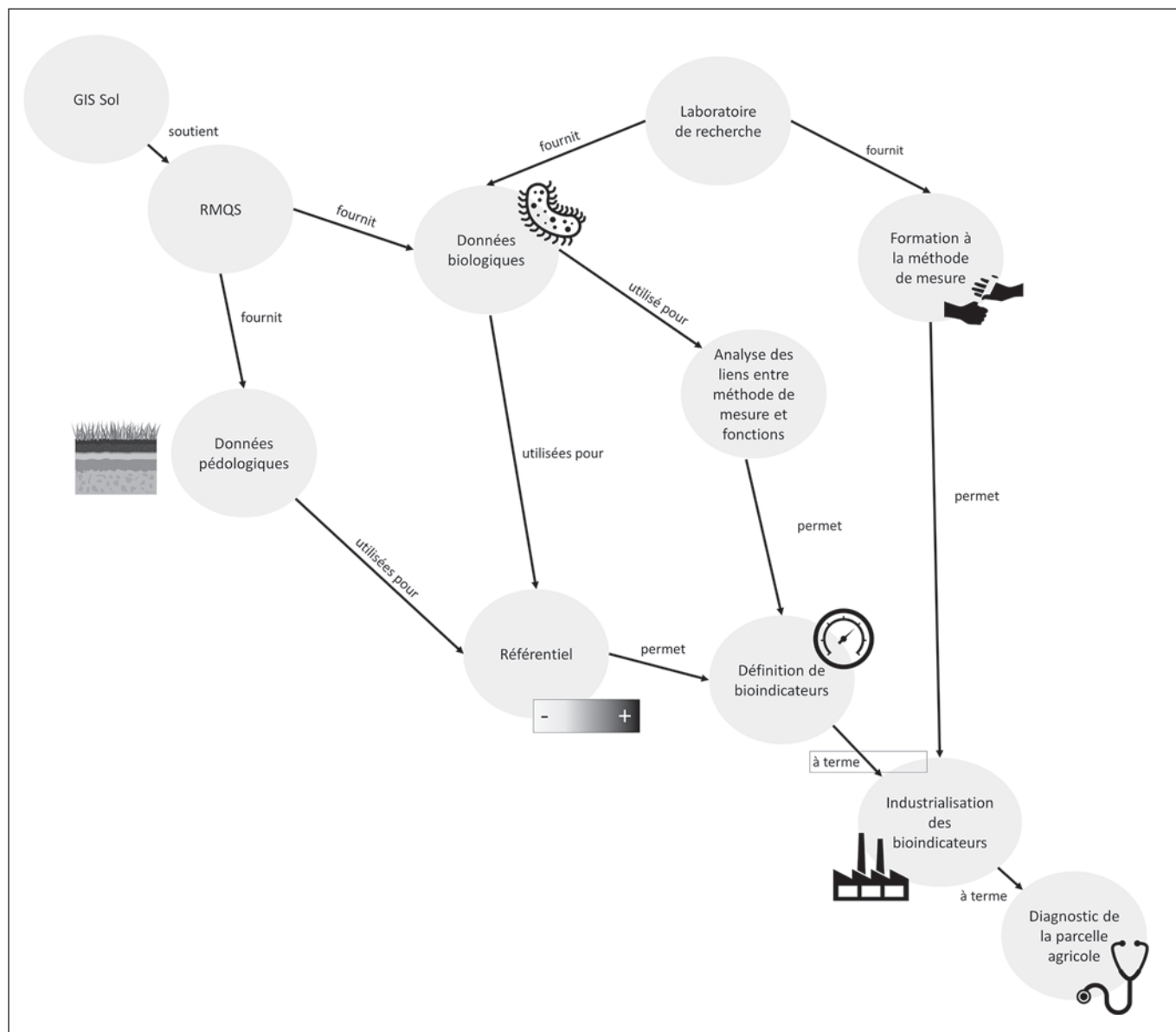
Les acteurs du territoire, et notamment les agriculteurs, ont besoin d'outils de diagnostic et de conseil, si possible peu onéreux, leur permettant d'évaluer le potentiel fonctionnel de leurs parcelles, ainsi que les progrès possibles dans une démarche de transition agroécologique. Cependant, les outils permettant d'apprécier l'état et le fonctionnement biologique des sols cultivés (abondance, activité et diversité des organismes du sol) ne sont pas encore démocratisés. Or, inclure la composante biologique dans les outils de diagnostic et de conseil est essentiel pour évaluer et piloter la diversité des services procurés par le sol.

Le programme Agro-Eco-Sol (2017-2022, financé via le PIA 4, <https://www.aurea.eu/agro-eco-sol-aperçu-de-la-boîte-a-outils/>) vise à proposer une expertise agronomique complète, du prélèvement au diagnostic et conseil opérationnel de gestion de la fertilité des sols agricoles. Cette solution est conçue pour faciliter l'accès aux bioindicateurs de qualité du sol, en complément de paramètres physico-chimiques classiques et de caractérisation de l'état structural. Grâce à ces mesures, l'agriculteur aura une meilleure connaissance du sol de sa parcelle et pourra être conseillé sur la gestion de la fertilité de son sol.

Les données du GIS Sol et notamment celles acquises sur le RMQS ont joué un rôle clé dans ce programme, en fournissant des informations pédologiques et biologiques (notamment sur les microorganismes, les vers de terre, les collembolles et les activités enzymatiques), utilisées pour construire des référentiels des bioindicateurs (gamme de variation par usage et pédoclimat), permettant d'en faire des outils de diagnostic de la qualité des sols (*Figure 3*).

Par manque de données, les seuls référentiels complètement finalisés à travers ce projet concernent les microorganismes du sol (bactéries et champignons) ainsi que les activités enzymatiques. La mise en place d'un programme complet de surveillance de la biodiversité sur le RMQS permettrait de compléter ces référentiels.

Par ailleurs, l'offre commerciale Agro-Eco-Sol étant désormais lancée, il s'agirait de réfléchir avec les différents laboratoires à mettre en place, comme pour le programme BDAT du GIS Sol, la collecte, la mise en base de données et les modes de restitution des informations sur la biodiversité des sols. La BDAT accueille actuellement exclusivement des données liées à la fertilité chimique des sols; elle pourrait se diversifier, en intégrant des paramètres biologiques. Cela étendrait cette collaboration entre le public et le privé. Cependant, l'accès aux données, leur compilation et leur diffusion restent encore à éclaircir.

Figure 3 : Implication du GIS Sol dans la mise en œuvre de l'utilisation en routine de bioindicateurs de la qualité des sols.**Figure 3:** Involvement of GIS Sol in the routine use of soil quality bioindicators.

4. LES DONNÉES PÉDOLOGIQUES EN SUPPORT AUX MESURES DE PROTECTION DES ESPÈCES MENACÉES

Les données pédologiques du GIS Sol (issues du programme IGCS- Inventaire, Gestion et Conservation des Sols) ont servi à deux programmes de protection d'espèces menacées: le pélobate brun et le grand hamster d'Alsace.

Le pélobate brun est un crapaud fouisseur très rare en France. Il est présent dans l'Est de la France et deux populations de

très petites tailles (de l'ordre de quelques dizaines d'individus à plusieurs centaines), résident dans la région Centre-Val de Loire. Elles sont isolées du reste de l'aire de répartition de l'espèce, s'étalant de la Moselle à la frontière entre la Russie et le Kazakhstan (Biotope et Service du Patrimoine Naturel, 2015). Celui-ci est menacé de disparition à l'échelle régionale en région Centre-Val de Loire (Jourdas, 2016).

Un plan National d'Action a été lancé, dont l'objectif était d'identifier des zones potentiellement favorables à cette espèce (Moulin et Eimberck, 2011). Pour ces travaux, la première étape consiste en l'identification des variables pertinentes pour décrire

l'habitat du Pélobate brun : la profondeur du sol, sa texture et son hydromorphie. Quatre classes de sols ont ensuite été établies grâce aux données des cartes de sol au 1/50 000^e portée par le GIS Sol : sables très hydromorphes, profonds ou non, sables sains moyennement profonds (< 80 cm), sables moyennement hydromorphes et profonds (80 cm) et sables sains et profonds (> 80 cm). Les caractéristiques des habitats terrestres et aquatiques favorables pour le Pélobate brun ont été croisées et cartographiées. L'accessibilité de chaque site aux habitats aquatiques a été vérifiée par photo aérienne. Grâce à ce travail, 170 sites favorables au crapaud en région Centre - Val de Loire ont été identifiés.

Des travaux similaires ont été conduits pour le grand Hamster d'Alsace qui fait partie des espèces en danger critique (www.iucnredlist.org). En France, dans le cadre du plan d'action national, une carte des sols alsaciens au 1/100 000^e a été élaborée à partir des données du guide des Sols d'Alsace, fournies par le GIS Sol (Antoni, 2007). En croisant ces données avec les connaissances sur l'espèce, des zones favorables à son installation ont été définies.

La connaissance des sols, capitalisée au sein des bases de données nationales, permet ainsi de définir les habitats des espèces terrestres. Ces données, encore peu ou mal connues, sont très certainement sous-utilisées dans le cadre d'études

de répartition des espèces animales vivant en surface et des espèces végétales.

5. VERS UNE STRATÉGIE POSSIBLE DU GIS SOL EN MATIÈRE DE SOUTIEN À LA CONNAISSANCE DE LA BIODIVERSITÉ DES SOLS

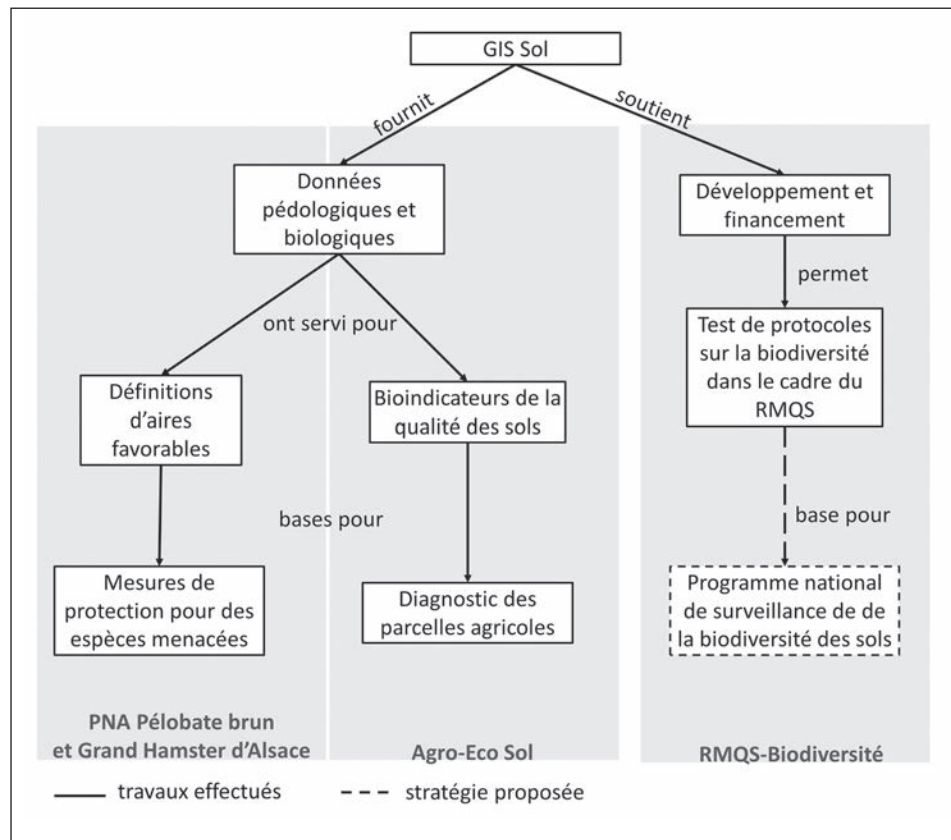
Le GIS Sol soutient depuis plus de 15 ans des programmes sur la biodiversité terrestre, et plus particulièrement des sols, de deux manières : en développant ses propres programmes d'acquisition à travers la mise à disposition du RMQS et en fournissant **des données pédologiques et/ou biologiques à d'autres acteurs** (Figure 4).

Ces différents exemples permettent de proposer une stratégie du GIS Sol, en faveur de la connaissance de la biodiversité des sols basée sur trois actions :

- faire connaître, expliquer et diffuser les données du GIS Sol (données pédologiques et données biologiques) afin que d'autres s'en emparent et les utilisent pour la préservation de la biodiversité des sols. Cette action de communication des données et résultats, déjà mise en œuvre, est à amplifier et les

Figure 4 : Implication du GIS Sol dans la connaissance et la protection de la biodiversité.

Figure 4: Involvement of GIS sol in biodiversity understanding and protection.



utilisations possibles dans le domaine de la biodiversité sont à mettre en avant ;

- pérenniser les suivis de biodiversité des sols au sein du RMQS (au-delà des seuls microorganismes du sol et des activités enzymatiques).

Après plusieurs projets et tests réalisés ces 15 dernières années, il nous semble possible de mettre en place un volet biodiversité pour compléter les données déjà acquises par ailleurs. Cela compléterait la surveillance des sols français mise en œuvre par le GIS Sol et permettrait de faire avancer la connaissance encore trop partielle de la biodiversité des sols et de ses interactions avec les pratiques de gestion (notamment agricoles). Sur ces bases, il serait alors possible de développer des bioindicateurs et leurs référentiels, afin de compléter l'évaluation de la santé des sols (Lehmann *et al.*, 2020). Une surveillance globale des sols français, incluant leurs trois composantes (physique, chimique et maintenant biologique) répondrait ainsi de manière pertinente aux politiques publiques émergentes ayant comme objectif de concilier activités humaines et intégrité des sols. À noter, comme le montre déjà l'exemple de l'offre Agro-Eco-Sol, que cela permettrait également de favoriser l'émergence de nouveaux marchés de prestation et de conseil. Avec le développement d'une offre commerciale de caractérisation biologique des sols (notamment à partir des informations fournies par le GIS Sol), il faudrait veiller à leur collecte au sein d'une BDAT renouvelée afin de faire progresser la connaissance nationale globale.

Si cette stratégie peut s'étager sur plusieurs années, le plus urgent reste actuellement que le GIS Sol décide de l'intégration d'un volet biodiversité au RMQS et surtout de son ambition (comme les groupes biologiques et le nombre de sites annuellement suivis).

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les relecteurs Nolwenn Bougon et Jérôme Mathieu pour leurs commentaires ayant permis d'améliorer significativement le manuscrit de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Antoni V. (2007). Applications IGCS au service de la biodiversité. Lettre du GIS Sol n°12. <https://www.gissol.fr/publications/lettres-du-gis/lettre-du-gis-n12-560>
- Biotope, Service du Patrimoine Naturel (MNHN) (2015). Plan national d'actions en faveur du pélobate brun *Pelobates fuscus* (Laurenti, 1768) 2014-2018.
- Burkhardt U., Russell D.J., Decker P., Döhler M., Höfer H., Lesch S., Rick S., Römbke J., Trog C., Vorwald J., Wurst E., Xyländer W.E.R. (2014). The Edaphobase project of GBIF-Germany—A new online soil-zoological data warehouse. *Appl. Soil Ecol.* 83, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.03.021>
- Decaëns T. (2010). Macroecological patterns in soil communities: Soil community macroecology. *Global Ecology. Biogeography.* 19, pp. 287–302. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00517.x>
- Direction Générale de l'Environnement (2023). Proposal for a directive of the European parliament and of the council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law).
- FAO (2020). State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities, Report 2020. Rome FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
- Geisen S., Briones M.J.I., Gan H., Behan-Pelletier V.M., Friman V.-P., de Groot G.A., Hannula S.E., Lindo Z., Philippot L., Tiunov A.V., Wall D.H. (2019). A methodological framework to embrace soil biodiversity. *Soil Biology Biochemistry.* 136, art. no.107536. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107536>
- Imbert C., Santorufu 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 de suivi de la biodiversité des sols : les programmes passés, présents et futurs. *Étude et Gestion des Sols*, 2021, 28 (1), pp. 193-206.
- IPBES (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. 1148 p.. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6417333>
- Jolivet C., Almeida Falcon J.-L., Berche P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehmann S., Maître B., Ratié C., Schellenberger E. (2018). Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS): RMQS2: deuxième campagne métropolitaine 2016-2027. Version 3, INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France
- Jourdas A. (2016). Le Pélobate brun *Pelobates fuscus* L., 1768. Espèces Emblématiques En Cent-Val Loire. Présentation orale.
- Kaspari M., Weiser M.D., Marshall K.E., Siler C.D., De Beurs K. (2023). Temperature–habitat interactions constrain seasonal activity in a continental array of pitfall traps. *Ecology* 104; Issue1. <https://doi.org/10.1002/ecy.3855>
- Köninger J., Panagos P., Jones A., Briones M.J.I., Orgiazzi A. (2022). In defence of soil biodiversity: Towards an inclusive protection in the European Union. *Biol. Conserv.* ISSN 0006-3207, 268, 2022, pp. 109475, JRC125863.
- Krüger I., Chartin C., van Wesemael B., Carnol M. (2018). Defining a reference system for biological indicators of agricultural soil quality in Wallonia, Belgium. *Ecological Indicators.* 95, pp. 568–578. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.010>
- Lehmann J., Bossio D.A., Kögel-Knabner I., Rillig M.C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1(10), pp. 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Mason E., Matt M., Lobmann M., Helming K., Hashar M.-R., Laszlo P., Francis N., Wall D., Prokop G., Rodriguez E., Lansac R., Carrasco V., Verdonk L., Bispo A. (2022). Existing R&I knowledge on sustainable soil and land management: a comprehensive overview. Presented at the World Congress of Soil Science, Glasgow, Scotland.
- Montanarella L. (2020). Soils and the European Green Deal. *Italian Journal of Agronomy.* 15 (4), pp. 262–266. <https://doi.org/10.4081/ija.2020.1761>
- Moulin J., Eimberck M. (2011). La cartographie des sols de l'Indre pour des applications thématiques diversifiées. *Étude Gestions des Sols.* 18(2), pp. 75–79.
- Orgiazzi A., Panagos P., Yigini Y., Dunbar M.B., Gardi C., Montanarella L., Ballabio C. (2016). A knowledge-based approach to estimating the magnitude and spatial patterns of potential threats to soil biodiversity. *Science of the Total Environment.* vol 545-546, pp. 11–20.
- Pulleman M., Creamer R., Hamer U., Helder J., Pelosi C., Pérès G., Rutgers M. (2012). Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* vol 4, Issue 5, pp. 529–538. ISSN 1877-3435. <https://doi.org/10.1016/j.cusost.2012.10.009>
- Reeve J.R., Hoagland L.A., Villalba J.J., Carr P.M., Atucha A., Cambardella C., Davis D.R., Delate K. (2016). Organic farming, soil health, and food quality: considering possible links. *Advances in Agronomy.* vol 137, pp. 319–367.

- Touroult J., Chaumet S., Poncet L., Siblet J.P. (2017). Diagnostic et recommandations pour une stratégie d'acquisition de connaissances naturalistes continentales. Tome I : analyse des besoins et des dispositifs existants. Rapp. MNHN-SPNUMS-2006-PatriNat. N° 2017-10, 253 p.
- Troudet J., Grandcolas P., Blin A., Vignes-Lebbe R., Legendre F. (2017). Taxonomic bias in biodiversity data and societal preferences. *Scientific Reports*. 7, 9132. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09084-6>
- van der Putten W.H., Bardgett R.D., Farfan M., Montanarella L., Six J., Wall D.H. (2023). Soil biodiversity needs policy without borders. *Science*, ISSN 0036-8075, 379 (6627), pp. 32–34. <https://doi.org/10.1126/science.abn7248>
- www.iucnredlist.org dernière consultation : 06-06-2023
- <https://sinp.naturefrance.fr/> dernière consultation : 08-08-2023

L'offre du GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain

J.-F. Brunet^(1*), P. Branchu⁽²⁾, C. Eychene⁽³⁾, S. Belbèze⁽¹⁾ et D. Guyonnet⁽¹⁾

1) BRGM, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex, France

2) Cerema, direction territoriale Ile-de-France, Equipe Team, 12 rue Teisserenc de Bort, 78190 Trappes, France

3) Soltracing, 9 rue des Pirogues de Bercy, 75012 Paris, France

* Auteur correspondant : jf.brunet@brgm.fr

RÉSUMÉ

Les acteurs de l'aménagement urbain portent un intérêt croissant aux informations leur permettant de qualifier et gérer les sols de leur territoire. Les données mises à leur disposition par les programmes du GIS Sol sont parmi les plus pertinentes pour les questions relatives à la prise en compte des sols, des fonctions et de la qualité chimique des sols. Dans ce dernier domaine, la base de données des analyses de sols urbains (BDSolU), portée par le BRGM, a vocation à jouer un rôle majeur. En effet, elle vise la mise à disposition de référentiels de fonds pédogéochimiques essentiels pour suivre les recommandations ministérielles en matière de diagnostic des sols potentiellement pollués et de gestion des terres excavées. Ce programme comprend l'acquisition de données, la mise au point du calcul des fonds pédogéochimiques et leur restitution aux utilisateurs. L'étude de l'interopérabilité des données BDSolU et DoneSol a aussi débuté pour permettre, à terme, l'interrogation simultanée des deux bases.

BDSolU a déjà contribué à la détermination de fonds pédogéochimiques des sols sur la basse vallée de la Seine à l'occasion du projet GeoBaPa piloté par Soltracing, et sur le territoire de Toulouse Métropole lors d'un projet de démonstration méthodologique conduit par le BRGM. En retour, des résultats d'analyses recueillis par ces projets ont aussi alimenté la base, ce qui permet d'améliorer sa représentativité statistique.

Les acteurs de l'aménagement ont désormais à répondre à de nouveaux enjeux et de nouveaux objectifs, notamment celui du zéro artificialisation nette (ZAN) fixé par la loi dite « Climat et résilience ». Celle-ci a introduit la prise en compte des fonctions exercées par les sols dans

Comment citer cet article :

Brunet J.-F., Branchu P., Eychene C.,
Belbèze S. et Guyonnet D., 2023 - L'offre du
GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain
Étude et Gestion des Sols, 30, 195-206

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

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

le Code de l'Urbanisme. Le projet partenarial MUSE, coordonné par le Cerema, a produit pour les sols des cartes au 1/250 000 d'indicateurs de fonction et d'indice de multifonctionnalité en s'appuyant sur les données du GIS Sol. Les outils cartographiques mis au point fournissent un portrait à connaissance sur les sols afin d'orienter les documents d'urbanisme. Ce projet met en avant le besoin de données complémentaires, pour augmenter l'échelle d'application mais également pour renseigner le milieu urbain.

À l'avenir, les programmes conduits par les membres du GIS Sol devront assurer la bancarisation de flux de données volumineux, respectant des prérequis en termes de qualité pour permettre l'appropriation de ces informations par l'ensemble des acteurs de l'aménagement du territoire. La sensibilisation de ces derniers à l'importance des sols et à leur préservation est un préalable indispensable.

Mots-clés

GIS Sol, DoneSol, RRP, BDSolU, aménagement urbain, économie circulaire, fonctions des sols, cartographie.

SUMMARY

THE GIS SOL OFFER TO PLANNING POLICIES AND URBAN POLICIES

Urban planning stakeholders are increasingly interested in information enabling them to qualify and manage the soils of their territory. The data made available to them by the GIS Sol programs are among the most relevant for questions relating to the consideration of functions and chemical quality of soils. In this last area, the database of urban soil analysis (BDSolU), supported by BRGM, which joined GIS Sol in 2021, should play a major role. Indeed, it aims to provide essential pedogeochemical backgrounds to follow ministerial recommendations for the diagnosis of potentially contaminated soils and the management of excavated soil. This program includes data acquisition, development of the calculation of pedogeochemical backgrounds and restitution to users. The study of the interoperability of BDSolU and DoneSol data, carried out by INRAE, has also begun to allow the simultaneous interrogation of the two databases.

BDSolU has already contributed to the determination of the pedogeochemical backgrounds of soils in the lower Seine valley as part of the GeoBaPa project led by Soltracing, and in the territory of Toulouse Métropole during a methodological demonstration project led by BRGM. In return, the analysis results collected by these projects have also fed the database, which improves its statistical representativeness.

Development actors now have to respond to new challenges and new objectives, in particular that of zero net artificialization (ZAN) set by the so-called "Climate and Resilience" law. This law introduced the consideration of the functions exercised by soils in the Town Planning Code. The MUSE partnership project coordinated by Cerema has produced soil maps at 1:250,000 of function indicators and multifunctionality index based on data from the GIS Soil. The mapping tools developed provide knowledge on soils in order to guide urban planning documents. This project highlights the need for additional data, to increase the scale of application but also to better understand the urban environment.

In the future, the programs carried out by the members of the GIS Sol will have to ensure the storage of large flows of data, while respecting prerequisites in terms of quality to allow the appropriation of this information by all the actors of the development of the territory. Raising their awareness of the importance of soils and their preservation is an essential prerequisite.

Key-words

GIS Sol, DoneSol, RRP, BDSolU, urban planning, circular economy, soils functions, cartography.

RESUMEN

LA OFERTA DEL GIS SOL A LAS POLÍTICAS DE ORDENACIÓN URBANA

Los actores de la ordenación urbana tienen un interés creciente en la información que les permita cualificar y gestionar los suelos de su territorio. Los datos proporcionados por los programas del GIS Sol son de los más pertinentes para las cuestiones relativas a la toma en cuenta de los suelos, de las funciones y de la calidad química de los suelos. En este último ámbito, la base de datos de análisis de suelos urbanos (BDSolU), llevada por el BRGM, tiene vocación de desempeñar un papel fundamental. En efecto, su objetivo es la puesta a disposición de referenciales de fondos pedogeoquímicos esenciales para seguir las recomendaciones ministeriales en materia de diagnóstico de los suelos potencialmente contaminados y de gestión de las tierras excavadas. Este programa incluye la adquisición de datos, la elaboración del cálculo de los fondos pedogeoquímicos y su restitución a los usuarios. El estudio de la interoperabilidad de los datos BDSolU y DoneSol, realizada por INRAE, también se ha iniciado para permitir, a largo plazo, la consulta simultánea de las dos bases.

BDSolU ya ha contribuido a la determinación de los fondos pedogeoquímicos de los suelos en el bajo valle del Sena durante el proyecto GeoBaPa dirigido por Soltracing, y en el territorio de Toulouse Métropole durante un proyecto de demostración metodológica dirigido por el BRGM. A su vez, los resultados de los análisis recogidos por estos proyectos también han contribuido a la base, lo que permite mejorar su representatividad estadística.

Los actores de la ordenación tienen ahora que responder a nuevos retos y nuevos objetivos, en particular el del cero artificialización neta (ZAN) fijado por la ley denominada «Clima y resiliencia». Ésta introdujo la toma en cuenta de las funciones ejercidas por los suelos en el Código de Urbanismo. El proyecto de colaboración MUSE, coordinado por Cerema, produjo para los suelos mapas al 1/250.000 de indicadores funcionales e índices de multifuncionalidad, utilizando los datos del GIS Sol. Los instrumentos cartográficos elaborados proporcionan información sobre los suelos para orientar los documentos de planificación. Este proyecto destaca la necesidad de datos complementarios, para aumentar la escala de aplicación pero también para conocer el medio urbano.

En el futuro, los programas dirigidos por los miembros del GIS Sol deberán garantizar la bancarización de flujos de datos voluminosos, respetando requisitos de calidad para permitir la apropiación de esta información por el conjunto de los actores de la ordenación del territorio. La sensibilización de estos últimos sobre la importancia de los suelos y de su conservación es una condición indispensable.

Palabras clave

GIS Sol, DoneSol, RRP, BDSolU, ordenación urbana, economía circular, funciones del suelo, cartografía.

LES ENJEUX ASSOCIÉS À LA CONNAISSANCE DE LA QUALITÉ DE SOLS

La nécessaire prise en compte des sols dans les opérations d'aménagement

L'aménagement du territoire, de la planification au projet d'aménagement urbains, a trop longtemps considéré les sols comme un support, négligeant largement leur importance écologique. Ces dernières années, les sols ont été mis à l'agenda sociétal (initiative citoyenne « People for soil »), politique (plan biodiversité), législatif et réglementaire, gagnant ainsi en considération. Le Code de l'urbanisme met ainsi en avant, depuis la promulgation en août 2021 de la Loi Climat et Résilience (Légifrance, 2021a) portant la lutte contre l'artificialisation des sols, l'importance des fonctions écologiques exercées par les sols et de leur préservation. **Les fonctions introduites dans la Loi sont les fonctions biologiques, hydriques et climatiques ainsi que le potentiel agronomique.** Ces fonctions, non définies dans le texte de Loi, s'approchent de celles proposées par la stratégie thématique européenne en faveur de la protection des sols (la production de biomasse et de matière première, le stockage, la filtration et la transformation d'éléments nutritifs, de substances et d'eau, la fourniture d'un support au développement de la biodiversité, la constitution d'un réservoir de carbone, ainsi que la conservation du patrimoine géologique et archéologique) mais restent globales par rapport à celles renseignées dans les publications scientifiques pour décrire la complexité du fonctionnement d'un sol (cf. par exemple Greiner *et al.*, 2017).

Face à cet enjeu, il est nécessaire de proposer une sensibilisation, d'œuvrer à une conscientisation sur les sols

et leurs importances mais également de fournir des outils aux différents acteurs en charge de la planification et de l'aménagement urbains pour qu'ils puissent intégrer la prise en compte des sols dans leurs choix. La mobilisation des données disponibles est alors indispensable pour proposer un véritable **porter à connaissance** sur les sols et ainsi orienter les choix d'aménagement notamment dans les zones péri-urbaines sous pression d'urbanisation. Le versement sur le Géoportail de l'IGN (<https://www.geoportail.gouv.fr/>) de la carte des sols français au 1/250 000 issue du programme IGCS (INRAE, 2020) en a constitué la première étape.

Le développement récent de méthodes pour estimer la qualité des sols, basées sur des indicateurs ou indices, illustre clairement les besoins opérationnels mais également les difficultés à produire des outils suffisamment robustes (Rabot *et al.*, 2017 ; Bünemann *et al.*, 2018 ; Blanchart *et al.*, 2019). Les méthodes proposées sont ainsi plus ou moins complexes et génériques et utilisent des jeux de données souvent importants ce qui rend leur transfert vers l'opérationnel complexe.

L'importance du fond pédogéochimique pour la gestion des sites et sols (potentiellement) pollués

Les villes sont remaniées en permanence par les activités humaines. Constructions, démolitions, excavations, terrassements, apports de terres et remblais de matériaux, naturels ou non, s'y succèdent depuis des siècles. Les sols ainsi anthropisés et les sols relictuels de la couverture pédologique initiale constituent une véritable mosaïque rendant leur cartographie difficile (Belbèze *et al.*, 2023 ; Branchu et Montagne, 2020).

Les villes sont aussi le théâtre d'émissions atmosphériques diffuses de diverses substances (échappement des véhicules,

cheminées des industries et des chauffages collectifs ou individuels) et localement de pollutions concentrées. Les usages et pratiques sont également responsables d'un enrichissement des sols urbains en substances polluantes.

Ces activités, ces intrants perturbent le fonctionnement et l'organisation des sols urbains. Il est donc nécessaire, dans la planification urbaine, de préserver les sols les plus fonctionnels, d'envisager dans certains cas de re-fonctionnaliser les sols dégradés dans les milieux urbains et avant tout, de mieux connaître ces sols et notamment leur composition chimique. En effet, leurs concentrations en métaux, en métalloïdes et aussi en composés organiques présentent souvent de fortes variations spatiales et les concentrations habituelles de ces substances, ce que l'on appelle **le fond pédogéochimique**, sont peu ou mal connues.

Les substances en question peuvent être des molécules organiques ou des composés et éléments minéraux. En vue d'éviter leurs potentiels effets nocifs sur le long terme, on se focalise sur les substances persistantes dans les sols, comme les métaux (plomb, mercure, chrome, cadmium...) et métalloïdes (arsenic, antimoine...) et les molécules qui ne sont pas ou peu sujettes à la dégradation : hydrocarbures dont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB), dioxines et furanes. On retient également les polluants persistants émergents comme les composés perfluorés ou certains principes actifs pharmaceutiques.

Certaines de ces substances peuvent avoir pour origine les activités humaines en plus d'être présentes dans les sols naturellement en fonction de la nature de la géologie locale. D'autres sont uniquement d'origine anthropique.

Il est donc nécessaire, particulièrement en milieu urbain, de tenir compte de l'influence diffuse des activités humaines sur le fond pédogéochimique naturel et c'est pourquoi l'on parle de **fond pédogéochimique anthropisé ou FPGA**.

Le fond pédogéochimique est essentiel pour **diagnostiquer les sites et sols pollués** (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017) et pour **valoriser les terres excavées** que l'on doit parfois évacuer des chantiers (Coussy et al., 2020). En effet, dans un cas comme dans l'autre, la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués recommande en premier lieu la comparaison de la qualité des sols des sites concernés avec, respectivement, des « valeurs d'analyse de la situation » et des « valeurs-seuils nationales ». Il s'agit de valeurs dérivées des concentrations dites « habituelles » des sols ou « gammes de valeurs couramment observées dans les sols « ordinaires » de toutes granulométries issues de l'étude ASPITET¹ » d'INRAE (Droissart-Long, 2018). Cette comparaison est souvent affinée au moyen de valeurs locales de fonds pédogéochimiques

ou de fonds pédogéochimiques anthropisés (Ministère de la Transition écologique, 2020).

Or, les valeurs ASPITET, déterminées à partir d'études conduites en milieux agricole et forestier (Baize, 2000), ne reflètent pas les concentrations habituelles en milieu urbain. Des valeurs de fond pédogéochimique anthropisé ont été produites localement par quelques projets et collectivités. Mais la méthode de calcul et même les protocoles pour l'obtention des données nécessaires à ce calcul font l'objet de débats (Belbèze et al., 2023). Ainsi, l'ensemble du territoire français n'est pas encore couvert sur la base d'une approche nationale robuste et homogène. Il y a pourtant un enjeu majeur à mieux connaître la qualité chimique des sols urbains, notamment dans le cadre de la requalification des friches urbaines encouragée par les différentes politiques gouvernementales et encore récemment par le **plan France Relance** (Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, 2022).

LES DÉVELOPPEMENTS MÉTHODOLOGIQUES AYANT MOBILISÉ LES DONNÉES

Porter à connaissance des sols et de leurs fonctions

Le projet MUSE - Un porter-à-connaissance des sols et de leur multifonctionnalité à l'échelle du territoire urbain

Le projet MUSE (Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme) financé par l'Ademe dans le cadre de l'appel à projet Modevalurba produit en 2022 (Branchu et al., 2022) une méthode générique applicable sur l'ensemble du territoire et basée en grande partie sur les données « sol » associées aux Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) afin de construire des cartes de quatre fonctions écologiques potentiellement exercées par les sols (régulation du cycle de l'eau, production de biomasse, réservoir de carbone et réservoir de biodiversité) et au final une carte de la multifonctionnalité potentielle des sols. Ces fonctions sont décrites par des indicateurs (potentiel d'infiltration, potentiel agronomique, stock potentiel de carbone et abondance/diversité lombriciennes, respectivement) reposant sur différentes données (données brutes du RRP au format DoneSol², données statistiques). Quelle

¹ ASPITET : Apports d'une Stratification Pédologique à l'Interprétation des Teneurs en Éléments Traces

² DoneSol est la base de données nationale structurant et regroupant les données ponctuelles et surfaciques des études pédologiques : <https://www.gissol.fr/outils/donesol-web-336#>

que soit l'origine de la donnée, la restitution cartographique en milieu non urbain s'appuie sur une représentation à l'échelle des unités cartographiques de sols proposées par le RRP. L'usage des données brutes associées au RRP a été, lorsque cela s'avérait possible, privilégié pour construire ces indicateurs. En raison de l'âge des RRP (et de leurs données), il a été choisi de s'appuyer sur les paramètres intrinsèques et pérennes du sol. Cela a ainsi été le cas pour les fonctions de production de biomasse et de régulation du cycle de l'eau (Figure 1). Les données utilisées sont celles correspondant à l'unité typologique de sol (UTS) prépondérante dans l'unité cartographique de sol (UCS) considérée. Les cartes des fonctions s'accompagnent alors d'une carte reflétant la représentativité de l'UTS considérée au sein de l'UCS. À ces cartes de fonctions sont également associées des cartes présentant les contraintes : salinité, pente, contamination pour le potentiel agronomique et pente pour le potentiel d'infiltration.

L'indice de multifonctionnalité est ensuite construit sur la base d'une simple somme des quatre fonctions écologiques (Figure 2).

Pour les deux autres fonctions (réservoir de carbone, réservoir de biodiversité), les données n'étant pas disponibles à l'échelle des UCS, il a été fait le choix d'utiliser des données exploitées non plus à l'échelle des UCS, mais à l'échelle des

Figure 1 : Logique de caractérisation des fonctions écologiques. © Cerema

Figure 1: Logic of characterization of ecological functions. © Cerema

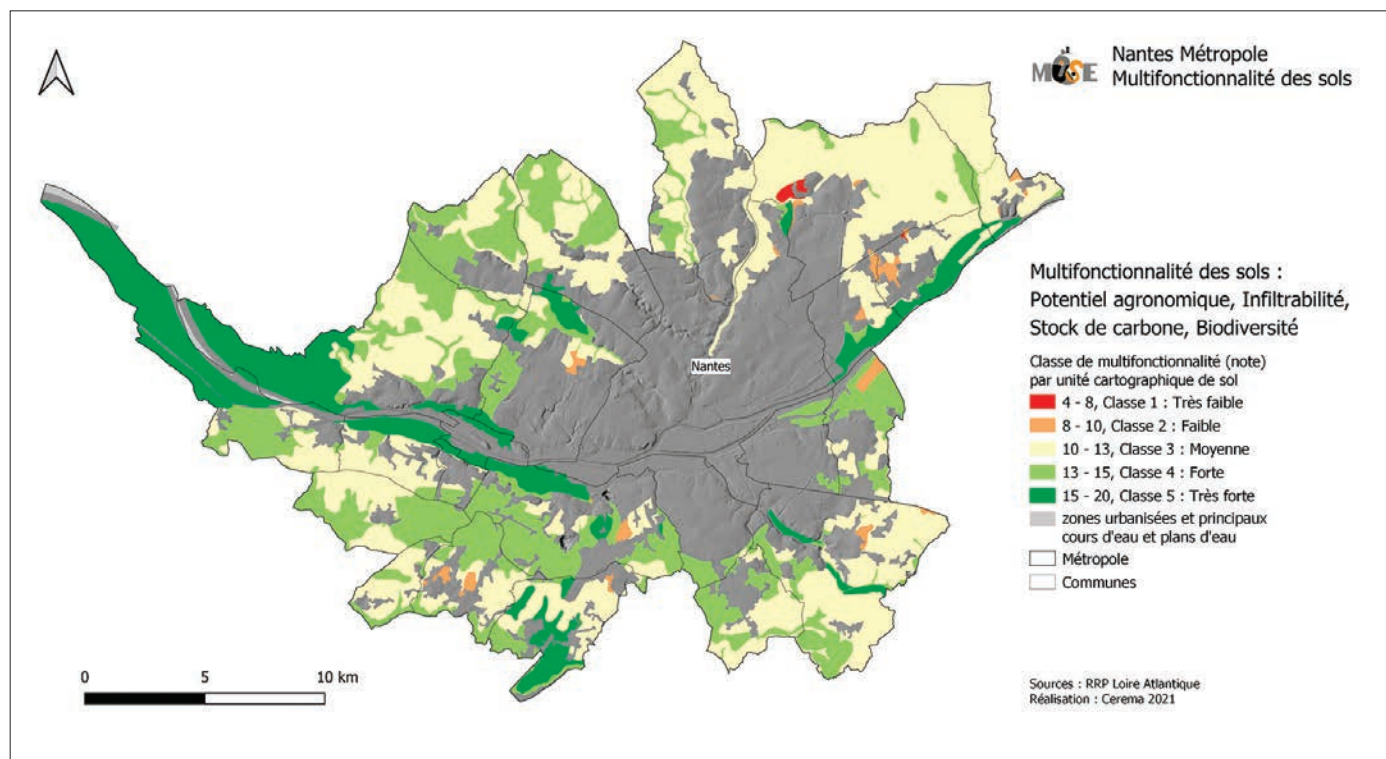
Fonction	Source de biomasse	Régulation du cycle de l'eau
Indicateur	Potentiel agronomique	Potentiel d'infiltration
Paramètre (sous-indicateur)	Réservoir utile Texture de surface pH Profondeur du sol Charge en éléments grossiers	Présence d'un niveau imperméable Texture de surface Degré d'hydromorphie Perméabilité du sol*

* Obtenu par fonction de pédotransfert

postes d'occupation des sols. Ces données ont été produites en partie à partir des données du programme « Réseau de Mesures de la Qualité des Sols » (RMQS) du Gis Sol. C'est notamment le cas des données issues de l'outil Aldo de l'ADEME qui permet d'estimer le stock de carbone du sol en fonction de l'occupation du sol (Perez *et al.*, 2018) et celui du réservoir de biodiversité qui s'appuie sur les données statistiques d'abondance et de diversité spécifique des vers de terre issues de la base de données EcoBioSoil (Observatoire National de la Biodiversité,

Figure 2 : Illustration de la carte de multi-fonctionnalité potentielle des sols sur le territoire non urbain de Nantes Métropole. © Cerema

Figure 2: Illustration of the map of potential soil multifunctionality in the non-urban territory of Nantes Métropole. © Cerema



2021). Les indicateurs stock de carbone et abondance/diversité des vers de terre ont ensuite été calculés pour chaque UCS du RRP.

Les différentes cartes sont associées à cinq classes notées de 1 à 5, la note 1 correspondant à une intensité de la fonction exercée, ou de la multifonctionnalité, la plus faible, et 5 à la plus forte. La représentation cartographique de ces notes va du rouge (note la plus faible) au vert (note la plus forte) (Figure 2).

Ces cartes, associées aux UCS des RRP, s'arrêtent aux abords des agglomérations urbaines, faute de données utilisables dans ces zones. À l'heure actuelle il est ainsi impossible d'appliquer la méthode décrite ci-dessus dans le milieu urbain. Le projet MUSE a alors fait appel, dans ces zones urbaines, à une approche par proxy basée sur le fait que la profondeur d'un sol permettrait d'approcher l'aptitude des sols à exercer certaines fonctions. L'hypothèse est faite que, suite au processus d'aménagement urbain, la profondeur du sol est pilotée par le type de végétation plantée. Le croisement du taux d'imperméabilisation des sols (données satellitaires du programme Copernicus) et du type de végétation (Base OCSGE de l'IGN ou données du programme Copernicus) permet alors de proposer un indice représentant la capacité potentielle d'un sol urbain à exercer tout ou partie des fonctions associées à un sol naturel. Cet indice est cartographié à une échelle très fine, les données Copernicus étant produites par carreaux de 10 x 10 m.

Perspectives

Ce travail illustre la possibilité de produire, à l'échelle du 1/250 000^e et en dehors du milieu urbain, des cartes de connaissance des sols et des fonctions qu'ils exercent.

Si ces cartes sont bien adaptées aux échelles supra-communales des schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) et des schémas de cohérence territoriale (SCoT), elles ne répondent pas aux besoins plus précis des PLU (Plans locaux d'urbanisme) et encore moins des projets d'aménagement. Des données supplémentaires sont alors nécessaires, notamment dans des zones à enjeux particuliers (biodiversité, agriculture...). Elles permettront ainsi d'orienter les choix de la collectivité dans son document d'urbanisme mais aussi de renseigner les indicateurs pour définir le degré d'artificialisation d'un sol dans le cadre d'un projet d'aménagement.

Les fonds pédogéochimiques anthropisés

Le projet Fonds pédogéochimiques Urbains (FGU)

- La détermination de fonds pédogéochimiques anthropisés en milieu urbain

Pour déterminer de façon uniforme le FPGA dans les grandes villes françaises, le BRGM avec le soutien de l'ADEME, a lancé depuis 2010 la collecte d'analyses de sols en milieu urbain dans le cadre du projet « Etablissements de fonds pédogéochimiques urbains - FGU ». A partir de 2014, la BDSolU a été conçue et développée comme base nationale de référence pour engranger et valoriser ces analyses (BRGM, 2022).

Ce projet de détermination des valeurs de fond pédogéochimiques urbains comprend quatre grands volets :

- la **bancarisation des données** collectées à travers la France ;
- l'**étude de l'interopérabilité** des données DoneSol et BDSolU ;
- la **mise au point d'une méthode de calcul du FPGA** ;
- la création d'une **interface interactive** permettant de restituer les résultats de ces calculs.

L'objectif est d'apporter un appui aux décideurs et aux aménageurs qui souhaitent mieux connaître la qualité des sols de leur territoire, notamment quand ils sont confrontés à des friches, donc au diagnostic des sols (potentiellement) pollués et à la valorisation des terres excavées.

Chacun de ces volets implique de relever des défis particuliers à chaque étape de la procédure, depuis l'acquisition jusqu'au traitement et à la diffusion des données.

Bancariser les données

Pour des raisons pratiques, le projet FGU ne fait pas appel à un programme spécifique de prélèvements et d'analyses. En effet, il repose sur la collecte des données existantes ou en cours d'acquisition produites par les collectivités et les organismes acteurs de la gestion des sols urbains : villes, métropoles, ministères, établissements publics fonciers, bureaux d'études, projets d'aménagement, projet de recherche. Ainsi, le premier projet contributeur appelé « Etablissements sensibles » a été conduit à partir de 2008 par le BRGM pour le ministère de l'Écologie et du Développement Durable, et consistait à réaliser des diagnostics préventifs des sols dans les établissements accueillant des enfants ou des adolescents (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2022).

Il est important de prendre en compte que les prélèvements contributeurs ne relèvent donc pas d'un plan d'échantillonnage dans une maille géographique régulière, dans une période de temps déterminée et selon un protocole établi. En outre, le prélèvement d'échantillons de sols en zone urbaine exclut le

plus souvent le respect d'une maille d'échantillonnage régulière, en raison de la présence de bâtiments et de la densité des différents réseaux (voies routières, égouts, distribution d'énergie, télécommunications, transports sous-terrain).

L'interopérabilité des données

L'interopérabilité des données DoneSol et BDSolU a été étudiée dans le cadre du projet FGU et du projet SUPRA (Sols Urbains et Projets d'Aménagement, *de l'échantillonnage des sols à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols*) conduit de 2018 à 2021 par le Laboratoire Sols et Environnement de l'Université de Lorraine (SUPRA, 2021). Il s'agit de rendre interopérables les données des bases BDSolU et DoneSol en raison de la complémentarité de leur contenu en matière de répartition géographique (espaces rural et urbain) et de paramètres analysés (chimiques et pédologiques).

À terme, cette interopérabilité, construite sur des standards reconnus et des normes internationales (Observations and Measurements, SensorThings API de l'Open Geospatial Consortium; OGC, 2022), permettra des croisements avec d'autres bases en France et à l'étranger. Les premiers jalons de possibles collaborations avec les programmes européens LUCAS³ (European Commission, 2021) et EUSO⁴ (Bispo et Le Bas., 2021) ont d'ores et déjà été posés.

Mise au point d'une méthode de calcul des Fonds pédogéochimiques anthropisés (FPGA) urbains

Les informations qui alimentent la BDSolU comportent une très forte hétérogénéité de lieux de prélèvement, de méthodes de sondage, d'échantillonnage et d'analyse, due aux différents objectifs visés par les divers projets contributeurs, aux différentes pratiques des intervenants et à l'évolution de ces pratiques dans le temps. Les résultats d'analyses ainsi recueillis font le plus souvent partie d'études de diagnostic de sols en lien avec des activités industrielles, potentiellement polluantes. De ce fait, elles ne sont pas systématiquement les plus représentatives du fond pédogéochimique recherché. En outre, la collecte de ces données d'origines diverses, leur mise en forme, la vérification et l'éventuel ajout des données descriptives complémentaires aux jeux de données fournis, impliquent un important travail d'harmonisation et représentent des postes importants lors de la constitution d'une telle base de données.

La base de données BDSolU a donc été prévue pour bancariser de nombreuses informations permettant de décrire les différents lieux de prélèvement à différentes échelles géographiques : registres d'occupation du sol dans la ville

« OCSOL GE » développés par le CRIGE en région PACA (CRIGE, 2014) sur la base du standard Corine Land Cover (European Environment Agency, 1995); activité au niveau de la parcelle avec les codes NAF développés par l'INSEE (INSEE, 2021); environnement proche dans un rayon de quelques dizaines de mètres autour du point de prélèvement; état de la surface du sol au point de prélèvement et, bien entendu, les coordonnées géographiques et altimétriques du point de prélèvement. Les descriptions des sondages (nature des niveaux et matériaux rencontrés, indices organoleptiques) et des échantillons prélevés, sont également recueillies dans la base. Les méthodes de sondage (à la pelle, au carottier...), d'échantillonnage (local ou composite), de préparation des échantillons sur site (par exemple le retrait des éléments grossiers), et enfin de préparation et d'analyse au laboratoire ou sur site sont aussi bancarisées. Dans la plupart des cas, ces dernières informations sont codifiées selon les registres développés par le SANDRE (Sandre, 2022).

Actuellement, la détermination de valeurs de fonds pédogéochimiques est réalisée par le BRGM dans le cadre du projet FGU. Le traitement des données comprend une étape de sélection d'analyses représentatives des FPGA attendus, puis une étape de calcul des valeurs de fond faisant appel à la **limite supérieure interne de Tukey** (Tukey, 1977). En raison des effectifs encore limités des résultats d'analyse bancarisés, les valeurs de fonds pédogéochimiques sont pour l'instant en cours de détermination pour quelques villes et agglomérations de France. Les résultats calculés pour ces zones géographiques dotées d'un nombre suffisant d'analyses, seront assortis d'avertissement sur les conditions générales de leur obtention et les limites de leur utilisation.

Restituer les résultats

À l'issue du traitement des données, le projet porteur de la BDSolU prévoit la diffusion des résultats des calculs en fonction de l'effectif de la population obtenue à l'étape de sélection. Si cet effectif est inférieur à un seuil bas actuellement fixé à 30, seules des statistiques de base (moyenne, médiane et principaux quantiles) ainsi que des représentations de la distribution de la population (histogrammes, boîtes de Tukey; Tukey, 1977) et des cartes seront fournies pour chaque élément ou substance. Ces cartes sommaires présenteront des cercles proportionnels aux concentrations analysées pour chaque point de prélèvement. Un effectif supérieur à 30 autorise le calcul et la proposition de valeurs de fond en complément de ces informations.

Toutefois, la restitution de données géoréférencées et de cartes présentant les points de prélèvement se heurte aussi à une volonté de la part des propriétaires des données de ne pas révéler la localisation de ces points afin de ne pas porter préjudice à la valeur foncière du terrain (même en cas de concentrations très faibles). Les consignes de confidentialité attachées à chaque lot de données sont donc également

3 LUCAS : Land Use and Coverage Area frame Survey
<https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/lucas>

4 EUSO : EU Soil Observatory
https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eu-soil-observatory-euso_en

bancarisées et prises en compte au moment de la sélection des données et de la restitution cartographique.

La mise à disposition de ces résultats au public est prévue en 2023.

Les perspectives du projet

Depuis 2018, le projet se poursuit en partenariat avec l'unité InfoSol d'INRAE, et eOde, un bureau d'études basé en Suisse, spécialiste des statistiques et de géostatistique, ainsi qu'avec l'appui de l'école des Mines de Paris.

À terme, la poursuite de la bancarisation de nouvelles données doit permettre d'étendre la restitution des fonds pédogéochimiques au reste du territoire national et plusieurs tâches restent à mener comme :

- le perfectionnement de la méthode de détermination des valeurs de fond et de l'algorithme associé ;
- la détermination des incertitudes de calcul ;
- le développement et l'automatisation de calculs d'interpolation et géostatistiques pour la restitution de cartes de FPGA (Sauvaget, 2019 ; Belbèze *et al.*, 2019) ;
- le développement de l'interface web et de l'outil cartographique interactif d'interrogation de la BDSolU en temps réel ;
- l'interrogation d'autres bases de données, dont DoneSol, grâce à la mise en place de l'interopérabilité des données.

LES FONDS PÉDOGÉOCHIMIQUES ANTHROPIÉS, EXEMPLES DE PROJETS UTILISATEURS ET CONTRIBUTEURS

Le projet GeoBaPa - Un référentiel de fonds pédogéochimiques pour la basse vallée de la Seine

Soltracing intervient dans le cadre de projets d'aménagement pour garantir les bonnes conditions de réutilisation des terres excavées, notamment le maintien de la qualité des sols sur les sites où sont réutilisées ces terres. Cette société privée est à la fois contributrice au programme BDSolU et utilisatrice de ses données. De 2016 à 2020, Soltracing a piloté le projet GeoBaPa (Soltracing, 2022a) de détermination des valeurs de fond sur la basse vallée de la Seine dans les régions Ile-de-France et Normandie. Ce projet a produit un référentiel spécifique à ces régions, sur la base de données recueillies en propre ou auprès de collectivités et d'organismes d'aménagement ou de recherche. Ces données rejoignent la BDSolU tandis que celles qui y étaient déjà bancarisées ont aussi été mises à contribution. Le référentiel GeoBaPa est utilisé pour les opérations de valorisation des

terres excavées dans le cadre de projets d'aménagement, notamment paysagers (Figure 3).

Soltracing intervient sur l'ensemble du territoire métropolitain et, dans ce cadre, sera utilisateur des données BDSolU obtenues dans d'autres régions et pour la détermination de fond pédogéochimiques dans des agglomérations comme Bordeaux, Toulouse ou Lyon. Ces données pourront être utilisées dans les outils d'aide à la décision que Soltracing propose en vue de garantir que les opérations de réutilisation respectent bien la qualité des sols urbains en place.

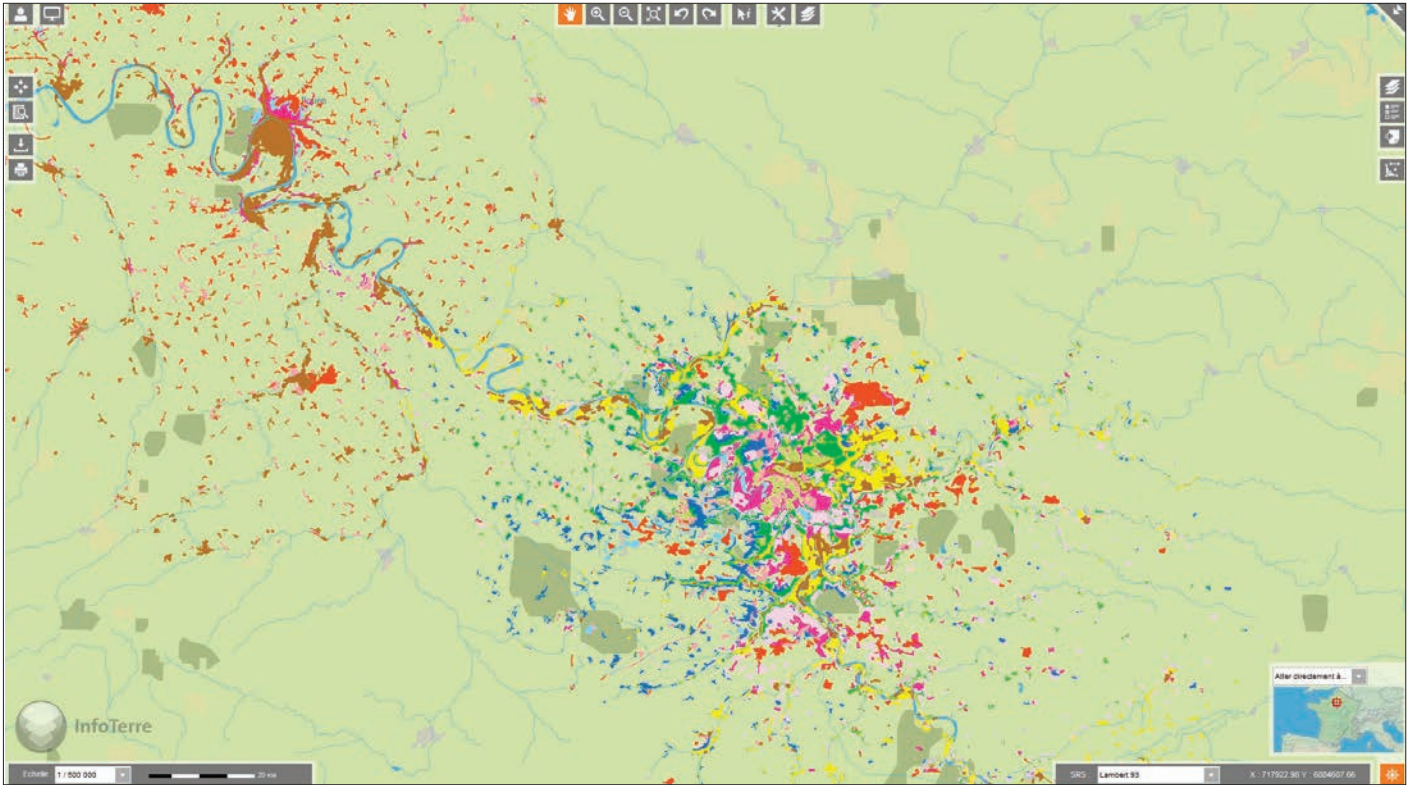
L'arrêté du 4 juin 2021 fixe les critères de sortie du statut de déchet des terres excavées. Ce texte a pour objectif de favoriser leur valorisation au détriment de leur évacuation en centre de stockage, pratique encore trop courante (Légifrance, 2021b). L'article R541-45 du Code de l'Environnement précise les conditions de leur traçabilité (Légifrance, 2021c). En effet, une partie des 160 millions de tonnes de terres excavées produites sur des chantiers de construction en France chaque année n'entrait pas dans un processus de traçabilité. En Ile-de-France ce volume de terres sans traçage s'élevait à 4 millions de tonnes. La connaissance des flux et de la qualité de ces terres, en particulier celles jugées *a priori* sans impact de pollution et parfois mal gérées, peut encore être améliorée. C'est l'enjeu des plateformes de caractérisation et de traçabilité en ligne comme celles développées par Soltracing (Soltracing, 2022b) ou par le BRGM avec l'appui du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (Terrass, 2022).

Le projet FGU Toulouse - Un démonstrateur de la méthode de détermination des fonds pédogéochimiques proposée par le groupe de travail conduit par l'ADEME

Le BRGM a réalisé pour le compte du Ministère de la Transition écologique et solidaire, une opération de démonstration de la faisabilité opérationnelle des recommandations des guides de détermination des valeurs de fonds produits par l'ADEME en 2018 (Belbèze *et al.*, 2019) (Figure 4). L'objectif était de fournir à Toulouse métropole un appui méthodologique pour la valorisation des terres excavées sur son territoire. L'outil développé vise en effet à terme, à apporter aux différents acteurs de la métropole (collectivités, bureaux d'études, promoteurs...) une meilleure connaissance de la qualité chimique des sols urbains. Cette opération a été l'occasion de valoriser des données déjà obtenues par la métropole Toulousaine dans le cadre d'un IHU (inventaire historique urbain), de ses chantiers d'aménagement et les données recueillies par la BDSolU sur son territoire (notamment dans le cadre des diagnostics des sols dans les établissements accueillant des enfants et des adolescents). Ces analyses ont été complétées par celles obtenues lors de deux

Figure 3 : Extrait de la cartographie géostatistique des sous-zones de fond pédogéochimique de type « remblai » obtenue par le projet GeoBaPa sur le Bassin Parisien ; légende et tableau des valeurs associées. Disponibles depuis le visualiseur InfoTerre du BRGM <http://infoterre.brgm.fr>.
© BRGM

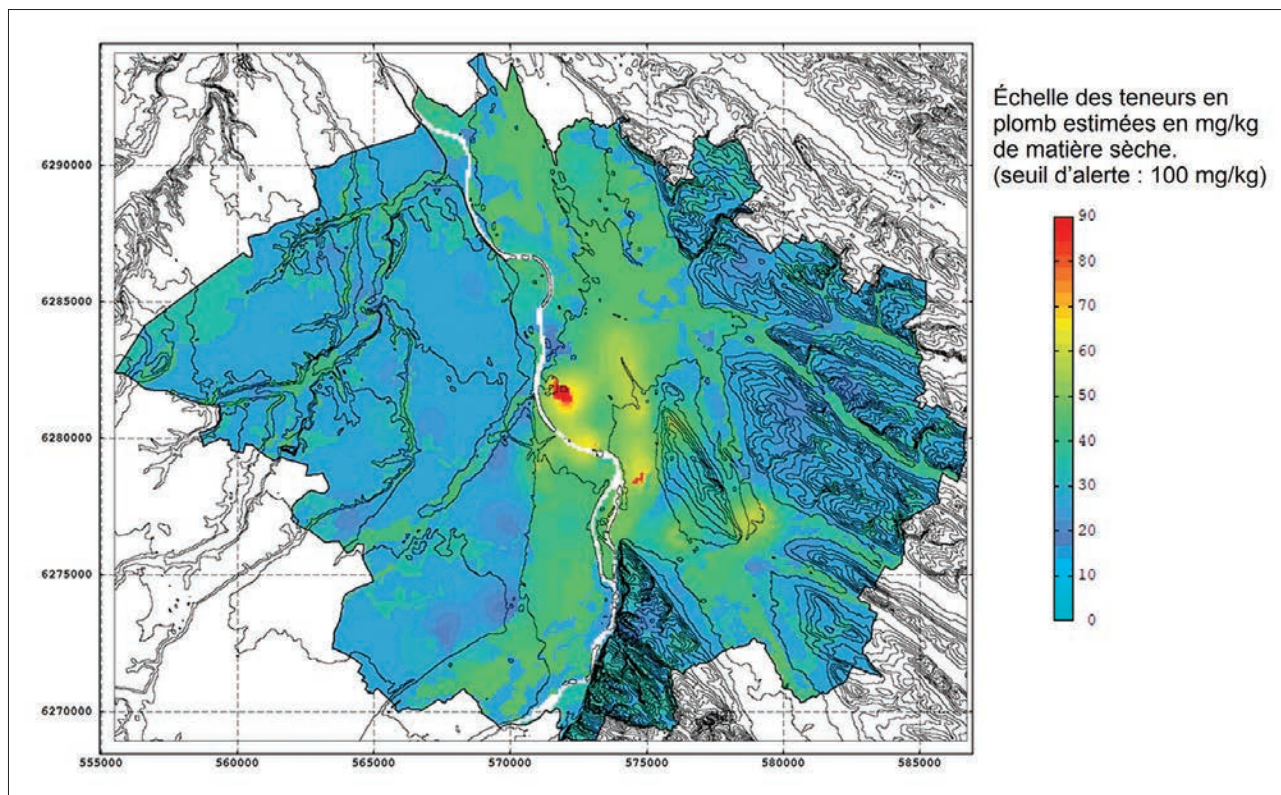
Figure 3: Extract from the geostatistical cartography of the sub-zones of the pedogeochemical background of the "backfill" type obtained by the GeoBaPa project on the Paris Basin; map legend and table of the associated values. Available from the BRGM InfoTerre viewer <http://infoterre.brgm.fr>.
© BRGM



VALEURS DE FOND PEDO-GEOCHIMIQUE – NIVEAU 2 (en mg/kg de matière sèche)																	
SUBSTANCE		ZONE 1	ZONE 2		ZONE 3	ZONE 4	ZONE 5	ZONE 6	ZONE 7	ZONE 8	ZONE 9	ZONE 10	ZONE 11	ZONE 12	ZONE 13	ZONE 14	ZONE 15
		Nat.	Nat.	Remb.	Nat.	Nat.	Nat.	Remb.	Remb.	Remb.	Remb.	Nat.	Remb.	Remb.	Remb.	Remb.	Remb.
ELEMENTS TRACES METALLIQUES	Arsenic (As)	25	25		30	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	Baryum (Ba)	150	170		150	150	150	210	150	230	160	150	150	150	230	300	160
	Cadmium (Cd)	0,4	0,4		0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,9	0,6	0,6	0,8	0,4
	Chrome (Cr)	90	90		100	100	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	Cuivre (Cu)	40	40		40	40	40	60	50	60	50	40	120	40	60	100	40
	Mercure (Hg)	0,1	0,1		0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	0,8	0,15	0,15	0,6	0,2	0,6	1,8	1,2
	Molybdène (Mo)	1,5	1,5		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Nickel (Ni)	60	60		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Plomb (Pb)	50	50		50	50	50	110	70	140	100	50	180	90	150	170	70
	Antimoine (Sb)	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Sélénium (Se)	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Zinc (Zn)	150	150		150	150	150	230	150	170	180	150	250	150	150	200	150
COMPOSES ORGANIQUES PERSISTANTS	7 PCB	0,1	0,1		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	16 HAP	10	10		10	10	10	10	10	20	10	10	10	15	10	10	10
SUBSTANCES ORGANIQUES	Hydrocarbures totaux C10-C40	50	50		50	50	50	50	60	80	300	100	100	150	100	150	80
« Nat. » : rendu unique ou présence de terrain naturel sur le site receveur (couleurs associées à la cartographie « Valeurs de fond pédogéochimiques uniques ou naturelles des régions Ile-de-France / Normandie »)																	
« Remb. » : présence de remblais anthropiques sur le site receveur (couleurs associées à la cartographie « Valeurs de fond pédogéochimiques en terrain remblayé des régions Ile-de-France / Normandie »)																	

Figure 4 : Cartographie géostatistique des teneurs en plomb du FPGA dans les sols urbains de la Métropole de Toulouse ayant pu être établie à partir des données disponibles (krigeage simple avec moyenne et variance locales variant en fonction de la géologie et de l'occupation du sol). © BRGM

Figure 4: Geostatistical mapping of the lead content of the FPGA in the urban soils of the Metropolis of Toulouse that could be established from the available data (simple kriging with local mean and variance varying according to geology and land use) (Belbèze et al., 2019). © BRGM



campagnes d'échantillonnage réalisées spécialement par le BRGM qui ont permis de réunir 40 échantillons de sols de surface et 100 échantillons de sols profonds prélevés tous les mètres dans 20 sondages de 5 m de profondeur. Les analyses ont porté sur 24 paramètres : éléments traces métalliques, HAP, cyanures totaux, indice phénol, PCB, BTEX, somme des hydrocarbures légers C5-C10, somme des hydrocarbures C10-C40 et dioxines. À leur tour, ces résultats complémentaires alimentent la BDSolU.

L'intérêt de jeux de valeurs de fond au niveau local est multiple et cela peut être illustré au travers de différents exemples :

- la comparaison des résultats d'analyses de sol disponibles aux seuils de niveau 1 du Guide ministériel de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement (Coussy et al., 2020) peut mettre en évidence des dépassements des valeurs seuils pour chacune des entités géographiques considérées. Dans ce cas, l'existence de valeurs de fond permet d'augmenter sensiblement les chances de trouver un **site receveur compatible** et susceptible de pouvoir accueillir les stocks de terres excavées ;

- la comparaison des résultats de diagnostics de sols aux valeurs du référentiel obtenu peut conduire à la réalisation d'**études de risques sanitaires**. Il complète alors le référentiel ASPITET habituellement utilisé, obtenu par INRAE pour des zones agricoles, quand celui-ci manque de valeurs pour certains paramètres, notamment les composés organiques.

Les méthodes d'exploitation des résultats proposées par le BRGM au travers de cette étude ont ainsi permis de définir, au regard du contexte local, les fonds pédo-géochimiques anthropisés sur le territoire de Toulouse Métropole (Figure 3). Ces valeurs ont vocation, par exemple, à favoriser l'économie circulaire, notamment la valorisation des terres excavées sur ce territoire tout en évitant de dégrader la qualité des sols de la zone d'accueil. Les valeurs de fond pédo-géochimique anthropisé permettent ainsi de limiter le nombre d'études de risques sanitaires habituellement nécessaires (Belbèze et al., 2019).

CONCLUSIONS ET BESOINS FUTURS

Les activités humaines exercent une forte pression sur les sols. Toutefois, le législateur s'est emparé de cette problématique et produit des textes de loi pour assurer la sauvegarde et la réhabilitation de cette ressource.

La lutte contre l'artificialisation des sols est au cœur de la **loi Climat et résilience de 2021**. Le projet MUSE a proposé des indicateurs des 4 fonctions écologiques introduites par cette loi et a produit des cartes utilisables dans les documents d'urbanisme. Il s'agit maintenant de déterminer comment caractériser un sol artificialisé ou une surface désartificialisée à l'échelle du projet d'aménagement ce qui permettra aux collectivités de mieux connaître les fonctionnalités des sols dans les milieux urbain et périurbain.

Le Code de l'environnement encadre la traçabilité des terres excavées. La connaissance des flux et de la qualité de ces terres devrait s'améliorer dans les années qui viennent. Il est toutefois fondamental que les aménageurs s'approprient ces démarches.

De même, la nécessaire requalification des friches urbaines pour limiter le mitage des campagnes est appuyée depuis 2014 par la **loi ALUR** (Accès au logement et à un urbanisme renoué ; Légifrance, 2014) et plus récemment par le **Plan France Relance** (Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, 2022). Elle implique de toujours mieux connaître la qualité chimique des sols urbains.

La BDSolU fait partie des programmes du GIS Sol depuis que le BRGM a rejoint le Groupement en janvier 2021. Les objectifs de ce programme restent l'appui aux décideurs et aux aménageurs en les informant de façon homogène, complète et précise sur les zones et zones urbaines et périurbaines. L'un des enjeux est une plus grande implication des collectivités détentrices de données, afin qu'elles alimentent la BDSolU. Ainsi, de nouvelles collaborations entre le programme BDSolU et des projets comme GeoBaPa ou la détermination des fonds pédogéochimiques sur le territoire de Toulouse Métropole sont encouragées.

À l'avenir, il conviendra d'encadrer la production de ces flux de données toujours plus volumineux pour les capitaliser dans de bonnes conditions, notamment dans les bases de données DoneSol et BDSolU. Cet autre enjeu important pour le GIS Sol nécessitera une sensibilisation de l'ensemble des acteurs (élus, aménageurs, citoyens), à l'importance des sols et à la préservation de leur qualité, notamment par le recours aux sciences participatives.

Les outils de caractérisation des sols et de leurs fonctions sont alimentés par les données de la base DoneSol en milieu rural et, dans un futur proche, feront aussi appel aux données relatives aux sols urbains disponibles dans la BDSolU. Des données agropédologiques, qui pourraient être produites dans le cadre de la mise en œuvre de la stratégie ZAN, seront aussi nécessaires.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les organisateurs de la journée des 20 ans du GIS Sol du 6 décembre 2021 à Paris, France, pour leur invitation à participer à cette journée puis à transcrire dans le présent article les propos échangés au cours de la session de cette journée intitulée « L'offre actuelle du GIS Sol en support aux politiques d'aménagement du territoire ». Cette session a intégré les présentations :

- de la base de données des analyses de sols urbains BDSolU pilotée par le BRGM avec le cofinancement de l'ADEME dans le cadre du projet FGU « Établissement de fonds pédogéochimiques urbains » conduit en partenariat avec INRAE et eOde, et avec l'appui de Mines ParisTech ;
- du projet « Référentiel de fond pédogéochimique du bassin parisien » GeoBaPa piloté par Soltracing avec le financement de l'ADEME, les Régions Ile-de-France et Normandie, le groupement d'Agences d'Urbanisme Vallée de la Seine et le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, en partenariat avec BG Ingénieur Conseils, Geovariances, le BRGM et ESIRIS Group ;
- du projet MUSE « Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme » soutenu par l'ADEME et le ministère de la Transition écologique et solidaire, et piloté par le Cerema en association avec INRAE, le BRGM, la Chambre d'Agriculture de l'Indre, l'IRSTV, l'Université Gustave Eiffel, l'Université Aix-Marseille et le CEREGE.
- Les diaporamas présentés et la vidéo de la discussion sont disponibles sur le site internet du GIS Sol : <https://www.gissol.fr/non-classe/journee-les-20-ans-du-gis-sol-5559>

Le BRGM remercie l'ADEME pour le co-financement du projet « Établissement de fonds pédogéochimiques urbains - FGU » (2010-2023), ainsi que pour son financement du projet « Sols Urbains et Projets d'Aménagement, de l'échantillonnage des sols à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols - SUPRA ». Le BRGM et Soltracing remercient l'ADEME, les régions Ile-de-France et Normandie, le groupement d'Agences d'Urbanisme Vallée de la Seine et le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer pour le financement du projet « Référentiel de fond pédogéochimique du bassin parisien - GéoBaPa ». Le BRGM remercie le ministère de la Transition écologique et solidaire pour son co-financement du projet « FGU Toulouse ». Le BRGM et le Cerema remercient le ministère de la Transition écologique et l'ADEME pour le financement du projet « Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme - MUSE ».

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME (2018). Méthodologie de détermination des valeurs de fonds dans les sols : Echelle d'un site/d'un territoire. Groupe de travail sur les valeurs de fonds. 107 p. <https://bibliaire.ademe.fr/sols-pollues/32-guide-pour-la-determination-des-valeurs-de-fonds-dans-les-sols-echelles-d-un-territoire-d-un-site.html>
- Baize D. (2000). Teneurs totales en « métaux lourds » dans les sols français. Résultats généraux du programme ASPITET. Le Courrier de l'Environnement de l'INRA. n° 39, pp. 39-54.
- Belbèze S., Rohmer, Négrel P., Guyonnet D. (2023). Defining urban geochemical backgrounds: a review and proposals for addressing uncertainties. *Science of the Total Environment* (soumis).
- 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., 73 fig., 37 tabl., 4 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-69502-FR.pdf>
- Bispo A., 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
- Blanchart A., Calvaruso C., Eglin T., Pierart A., Grand C. (2019). Méthodologies d'évaluation des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols, Synthèse séminaire du 12 juin 2019, INRA Orléans. 31 p.
- Branchu P., Marseille F., Béchet B., Bessière J.-P., Boithias L., Duvigneau C., Genesco P., Keller C., Lambert M.-L., Laroche B., Le Guern C., Lemot A., Métois R., Moulin J., Néel C., Sheriff R. (2022). MUSE. Intégrer la multifonctionnalité dans les documents d'urbanisme. 184 pages. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/prendre-compte-multifonctionnalite-sols-amenagement>
- Branchu P., Montagne D. (2020). Les sols (péri)urbains : entre gradients d'anthropisation et de contamination, pp. 16-23, *In Mouglin et al.* (Eds), Les sols urbains sont-ils cultivables ? Editions Quae, Paris.
- BRGM (2022). Site internet BDSolU.fr. <http://www.bdsolu.fr/>
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Flesskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L. (2018). Soil quality - A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 105-125. doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030
- Coussy S., Dubrac N., Hulot C., Billard A., Kaabouch S. (2020). Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement. MTES/DGPR/Bureau du sol et du sous-sol. Version 2. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/guide-valorisation-hors-site-terres-excavees>
- CRIGE (2014). BD Ocsol PACA Base de donnée régionale d'occupation des sols <https://www.crige-paca.org/projets/bd-ocsol-paca/>
- Droissart-Long A. (2018). Méthodologie de gestion des sites et sols pollués - Principales évolutions - Interprétation de l'état des milieux (IEM) et introduction des valeurs d'analyse de la situation (VAS) - Révision de 2017. Conférence « Les Mardis de la DGPR » du 23 janvier 2018, Paris, France. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/mardi-dgpr-23-janvier-2018-methodologie-gestion-sites-sols-pollues>
- 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>
- European Environment Agency (1995). Corine Land Cover. <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>
- Greiner L., Keller A., Grêt-Regamey A., Papritz A. (2017). Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services, *Land Use Policy*, 69: 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.025>
- INRAE (2020). Communiqué de presse « Une nouvelle carte des sols de France accessible à tous ». <https://www.inrae.fr/actualites/nouvelle-carte-sols-france-accessible-tous>
- INSEE (2021). Nomenclature d'activités française. <https://www.insee.fr/fr/information/2406147>
- Légifrance (2014). LOI n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000028772256/>
- Légifrance (2021a). LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets - NOR : TREX2100379L <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>
- Légifrance (2021b). Arrêté du 4 juin 2021 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les terres excavées et sédiments ayant fait l'objet d'une préparation en vue d'une utilisation en génie civil ou en aménagement. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043704475>
- Légifrance (2021c). Code de l'environnement Article R541-45 https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043308106/
- Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, (2022). Fonds pour le recyclage des friches. <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/mesures/fonds-recyclage-friches>
- Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer (2017). Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/methodologie-nationale-gestion-sites-sols-pollues>
- Ministère de la Transition écologique (2020). Guides de valorisation hors site des terres excavées dans des projets d'aménagement. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/guide-valorisation-hors-site-terres-excavees>
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2022). Démarche établissements sensibles <http://ssp-infoterre.brgm.fr/page/demarche-etablissements-sensibles>
- Observatoire National de la Biodiversité (2021). <https://naturefrance.fr/indicateurs>
- OGC (2022). SensorThings - Introduction. <http://opengeospatial.github.io/e-learning/sta/text/main.html>
- Perez L., Buitrago M., Eglin T. (2018). Notice technique de l'outil ALDO : Estimation des stocks et des flux de carbone des sols, des forêts et des produits bois à l'échelle d'un EPCI. 21 p.
- Rabot E., Keller C., Ambrosi J.-P., Robert S. (2017). Revue des méthodes multiparamétriques pour l'estimation de la qualité des sols, dans le cadre de l'aménagement du territoire. *Etude et Gestion des Sols*, 24, pp. 59-72.
- Sandre (2022). Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau. <https://www.sandre.eaufrance.fr/>
- Sauvaget B. (2019). Constitution de référentiels géochimiques locaux pour les sols et proches sous-sols urbains : de la base de données à l'interprétation géostatistique. *Géochimie*. Université Paris sciences et lettres, 2019. Français. (NNT : 2019PSLEM014). <https://www.theses.fr/2019PSLEM014>
- Soltracing (2022a). Le projet GeoBaPa. <https://soltracing.fr/geobapa>
- Soltracing (2022b). Notre offre pour réussir une valorisation de terres <https://soltracing.fr/offre>
- Supra (2021). Sols urbains : les caractériser pour aider la décision de leur affectation lors des projets d'aménagement. <https://expertises.ademe.fr/content/supra-sols-urbains-projets-damenagement>
- Terrass (2022). L'application Terrass. <https://tex-infoterre.brgm.fr/fr/terrass/lapplication-terrass>
- Tukey J.W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company. ISBN 0-201-07616-0 CDEGFGHIJ-HA-798

Le GIS Sol dans les départements et régions d'Outre-mer français

M. Brossard^(1*), K. Fujisaki^(1,2), C. Jolivet⁽²⁾, E. Dupuits-Bonnin⁽³⁾, M. Jameux⁽⁴⁾, S. Jalabert⁽⁵⁾, E. Toulemonde Le Ny⁽⁶⁾, T. Becquer⁽¹⁾, D. Blavet⁽¹⁾, A. Beaudou⁽⁷⁾, L. Boulonne⁽²⁾, T. Desjardins⁽⁸⁾, H. Le Martret⁽⁹⁾ et C. Ratié⁽²⁾

- 1) IRD, UMR 210 Eco&Sols, 34060 Montpellier cedex 2, France
- 2) INRAE, Unité Info&Sols, 45075, Orléans, France
- 3) 44300, Nantes, France
- 4) PNR du Lubéron, Apt, France
- 5) UMR 5805 EPOC, Bordeaux Sciences Agro, 33175 Gradignan Cedex, France
- 6) INAO, Montpellier, France
- 7) Retraité, ancien pédologue IRD
- 8) IRD-IEES, Centre IRD France Nord, 93143 Bondy cedex, France.
- 9) Retraité, ancien informaticien et pédologue IRD

* Auteur correspondant : michel.brossard@ird.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente les axes des travaux pédologiques effectués dans les régions ultramarines françaises dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol. Ces travaux concernent les programmes « Réseau de mesures de la qualité des sols » (RMQS) et « Inventaire, Gestion et Conservation des Sols » (IGCS), conduits aux Petites Antilles, Martinique et Guadeloupe, à La Réunion et Mayotte, et en Guyane. Ces travaux revêtent un caractère particulier du fait que les territoires concernés sont soumis à des climats variés dans la bande intertropicale et des conditions de développement des sols contrastées sur des lithologies continentales du socle et insulaires volcaniques.

Dans le cadre du programme IGCS, les travaux se sont axés dans un premier temps sur l'inventaire et la sauvegarde numérique des connaissances de la distribution des sols acquises dans ces territoires depuis les années 1950. Dans un second temps, des synthèses morpho-pédologiques ont été réalisées grâce à ces données pédologiques numérisées et intégrées à une base de données, complétées par des données géologiques et géomorphologiques. Ces travaux sont illustrés dans cet article à travers le cas de la Guadeloupe.

Comment citer cet article :

Brossard M., Fujisaki K., Jolivet C., Dupuits-Bonnin E., Jameux M., Jalabert S., Toulemonde Le Ny E., Becquer T., Blavet D., Beaudou A., Boulonne L., Desjardins T., Le Martret H. et Ratié C., 2023 - Le GIS Sol dans les départements et régions d'Outre-mer français, *Étude et Gestion des Sols*, 30, 145-168

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

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

La première campagne du programme RMQS, qui s'est déroulée entre 2006 et 2015, a porté sur 67 sites dans les mêmes territoires. La mise en place de ce programme en Outre-mer s'est faite avec quelques adaptations par rapport au dispositif mis en place dans l'Hexagone, et qui concernent l'implantation des sites, les analyses de sols réalisées et la gestion des échantillons de sols. Quelques résultats de ce programme sont discutés, concernant les stocks de carbone du sol en Guyane, et les teneurs en éléments traces métalliques et hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les territoires insulaires. Enfin, les pistes d'évolution du programme sont discutées, afin d'améliorer le suivi des propriétés des sols dans ces territoires.

Mots-clés

Sol tropical, RMQS, IGCS, qualité des sols, base de données pédologiques, Guadeloupe, Guyane, Martinique, La Réunion, Mayotte

SUMMARY

THE "GIS SOL" IN THE FRENCH OVERSEAS DEPARTMENTS AND REGIONS

This article presents the main lines of soil research carried out in the French ultramarine regions within the framework of the Scientific Interest Group Sol (GIS Sol). This work concerns the programs "French Soil Quality Monitoring Network" (RMQS) and "Soil Inventory, Management and Conservation" (IGCS), which were conducted in the Lesser Antilles, Martinique and Guadeloupe, Reunion and Mayotte, and French Guiana. This work has a particular nature because these territories are subject to various climates in the intertropical area, contrasting soil development conditions on continental basement and volcanic island lithologies.

For IGCS program, in a first step, legacy data from 1950s regarding soil distribution in these regions were compiled and saved in digital medium. In a second step, morpho-pedological syntheses were made thanks to these legacy data along with geological and geomorphological data, embedded in a database. These works are illustrated in this article with the case of Guadeloupe.

The first campaign of RMQS program in overseas was conducted between 2006 and 2015. 67 sites were sampled. The experimental set-up was made with a few adaptations from the set-up in mainland France, regarding site installation, soil analyses, and soil samples management. Some results of this program are presented and discussed: soil carbon stocks in French Guiana, and contents of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in island areas. Lastly, strategic pathways for this program are discussed, in order to improve the monitoring of soil properties in these regions.

Key-words

Tropical soil, RMQS, IGCS, soil quality, soil data base, Guadeloupe (WI), French Guiana, Martinique (WI), Réunion, Mayotte.

RESUMEN

EL "GIS SOL" EN LOS DEPARTAMENTOS Y TERRITORIOS FRANCESES DE ULTRAMAR

Este artículo presenta los ejes de los trabajos edafológicos desarrollados en las regiones ultra-marinas francesas en el marco de la "Agrupación de Interés Científico suelo" (GIS Sol). Estos trabajos se refieren a los programas «Red de medidas de la calidad de los suelos de Francia» (RMQS) y «Inventario, Gestión y Conservación de los suelos» (IGCS), fueron ejecutados en las Antillas Menores, Martinica y Guadalupe, en La Reunión y Mayotte en el Océano Índico, en Guyana francesa. Estos trabajos revisten un carácter particular porque los territorios afectados están sometidos a climas variados en la franja intertropical, condiciones de desarrollo de los suelos contrastadas sobre litologías continentales del zócalo e insulares volcánicos.

En el marco del IGCS, en un primer tiempo se ejecutó el inventario y el rescate numérico de los conocimientos de la distribución de los suelos, inventarios adquiridos desde los años 1950. En un segundo tiempo, fueron realizadas síntesis morfo-edafológicas gracias a esos datos integrados en una base de datos, completados por datos geológicos y geomorfológicos. Estos trabajos están aquí ilustrados con el ejemplo de la Guadalupe.

La primera campaña del programa RMQS abarcó 67 sitios en los mismos territorios, entre 2006 y 2015. El establecimiento de este programa en ultramar fue hecho con algunas adaptaciones del dispositivo inicial del territorio de la metrópoli, en particular sobre la instalación de los sitios, el análisis de suelos, y la gestión de las muestras de suelos. Algunos resultados de este programa son discutidos, en particular los estoques de carbono del suelo en la Guyana, las concentraciones de elementos trazos metálicos, e hidrocarburos aromáticos policíclicos de los territorios insulares. Finalmente, algunas evoluciones del programa son discutidas con el fin de mejorar el acompañamiento de las propiedades de los suelos de estos territorios.

Palabras clave

Suelo tropical, IGCS, RMQS, calidad del suelo, base de datos de suelos, Guadalupe (Antillas Menores), Guyana francesa, Martinica (Antillas Menores), La Reunión, Mayotte.

1. INTRODUCTION

En 2006, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) intègre en tant que partenaire le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol, www.gissol.fr), apportant ainsi l'expertise des sols des régions ultramarines (Arrouays *et al.*, 2022). Les travaux se sont déclinés dans le cadre des programmes IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols) et RMQS (Réseau de mesures de la qualité des sols).

Les sols tropicaux français occupent une surface proche du cinquième du territoire hexagonal si l'on comptabilise les collectivités territoriales ultramarines. Les travaux qui ont été réalisés dans le cadre du GIS se sont centrés sur les départements et régions des territoires de la Guadeloupe, de la Guyane, de la Martinique, de La Réunion et de Mayotte (Figure 1, Tableau 1). Ils sont répartis dans la zone intertropicale et couvrent environ 92 000 km² sur lesquels vivent plus de deux millions d'habitants (2 177 251 hab., données INSEE 2019 et 2017 pour Mayotte) (INSEE 2022). Ces milieux subissent actuellement l'impact de fortes pressions démographiques sur des surfaces réduites, 90 % des populations évoquées vivant en domaine insulaire. Ces régions sont particulières au regard de l'expérience métropolitaine des pédologues. La Guyane est un domaine continental à climat équatorial, alors que les milieux insulaires sont majoritairement volcaniques et présentent des contraintes

physiographiques et bioclimatiques particulières. Entre 2010 et 2020, l'espace cultivable a diminué dans les îles, mais a augmenté en Guyane (ODEADOM, 2022). Les sols des Outre-mer font face à diverses pressions anthropiques. La pression foncière est importante et a provoqué la diminution des espaces agricoles aux Antilles ; son évolution au cours des prochaines décennies sera soumise à la dynamique démographique, qui est contrastée en Outre-mer. La lutte contre les bioagresseurs dans les agroécosystèmes passe très fréquemment par l'emploi de produits phytosanitaires, pouvant provoquer des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine. Le cas le plus connu est celui du chlordécone, un insecticide organochloré massivement utilisé dans les bananeraies aux Antilles entre 1972 et 1993. Si de nombreux travaux sont menés pour évaluer l'ampleur de la contamination des écosystèmes par le chlordécone et ses effets sur la santé humaine (Cabidoche et Lesueur-Jannoyer, 2011 ; Maudouit et Rochoy, 2019 ; Rochette *et al.*, 2020), la contamination des sols et ses conséquences sur les écosystèmes par les autres produits phytosanitaires ont été peu étudiées en Outre-mer (Mamy *et al.*, 2022). Enfin, les sols forestiers en Guyane sont menacés par la déforestation d'origines agricole et minière. L'exploitation aurifère, en partie illégale, a contribué à la remobilisation des éléments traces naturellement accumulés dans les sols au cours du temps, dont le mercure (Grimaldi *et al.*, 2015). Les conditions anoxiques

Figure 1 : Les départements et régions françaises de l'Outre-mer concernés par le développement des programmes IGCS et RMQS (2004-2022), cerclés en rouge, parmi l'ensemble de l'Outre-mer français. (Source : site du Ministère en charge des Outre-mers, 2009).

Figure 1: French overseas departments and regions where the IGCS and RMQS programs were developed (2004-2022), red circles around the French overseas territories (yellow points). (Source: site of the Ministry in charge of French overseas, 2009).

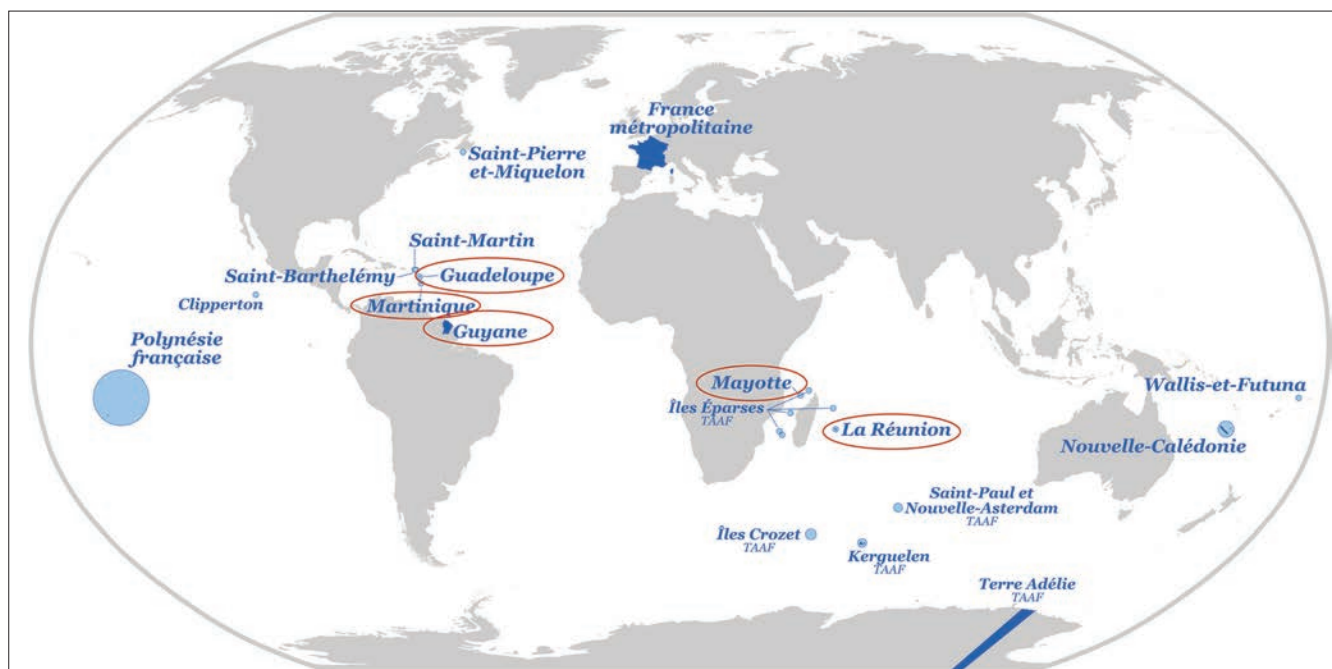


Tableau 1 : Principales caractéristiques des territoires étudiés : géographie physique, statut administratif, densité de population, occupation des sols.

Table 1: Main characteristics of the studied territories: physical geography, administrative status, population density, land cover.

Territoire		Guadeloupe	Guyane	Martinique	La Réunion	Mayotte
Géologie		Volcanisme actif depuis le Plio-pléistocène (8 Ma) et Sédiments calcaires du Miocène	Socle Précambrien (2500 - 542 Ma) et formations sédimentaires depuis le Pliocène (542 Ma/actuel)	Volcanisme actif actuel depuis 8 Ma, et volcanisme « ancien » actif durant Eocène-Miocène	Volcanisme de point chaud, 2,1 Ma, partie active récente émergée depuis 530 Ka.	Volcanisme éteint depuis 8 Ka.
Climat		Tropical maritime, chaud et humide, tempéré et uniformisé par l'alizé, saisons contrastées. Archipel soumis aux cyclones. L'altitude et l'exposition aux vents contrôlent la pluviométrie.	Équatorial humide	Tropical maritime, chaud et humide, tempéré et uniformisé par l'alizé, saisons contrastées. Archipel soumis aux cyclones. L'altitude et l'exposition aux vents contrôlent la pluviométrie.	Tropical maritime, alizés du sud-est, confèrent un climat très humide au vent et plus contrasté sous le vent. L'altitude et l'exposition aux vents contrôlent la pluviométrie.	Tropical d'alizé maritime à saisons contrastées. Île parfois soumise aux cyclones.
Statut		Département & Région	Collectivité unique	Collectivité unique	Département & Région	Département
Densité Population, hab km⁻² *		236,0	3,4	323,1	344,0	702,9
Superficie, km²		1628	83534	1128	2504	374
Occupation des sols (moyenne 2017-2018-2019)** % surface	Sols artificialisés	13	0,02	15	14	8
	Surfaces sous les eaux	2	8	2	2	1
	Landes, friches, sols nus naturels	9	-	6	13	9
	Bois et forêts	49	92	51	52	56
	Formations végétales herbacées des régions tropicales et sub-tropicales	9	0,3	9	4	1
Sols cultivés		17	0,004	17	14	26

* www.INSEE.fr/statistiques données 2019 consultées en 2022, Mayotte données 2017 ; ** Agreste 2021

rencontrées dans les sols hydromorphes des bas-fonds provoquent la conversion du mercure en monométhylmercure, qui constitue la forme de mercure la plus toxique et accumulable par les organismes vivants (Carmouze *et al.*, 2001).

Les territoires de l'Outre-mer sont régulièrement le siège de revendications multiples (Jacob, 2017). Les enjeux de l'usage des sols en lien avec leur qualité ne peuvent être ignorés comme l'a mis en valeur la crise de la chlordécone. Les efforts de connaissance des sols et d'une offre la plus large possible de cette connaissance doivent être soutenus.

2. CONNAISSANCE DES SOLS ULTRAMARINS : CONTRIBUTION AU PROGRAMME INVENTAIRE GESTION ET CONSERVATION DES SOLS (IGCS)

2.1. Les travaux d'inventaires anciens et les grands traits pédologiques

Au début des années 1950, l'Office de la recherche scientifique et technique Outre-mer (Orstom) a réalisé des travaux de reconnaissances pédologiques en Afrique, en Nouvelle-Calédonie et en Guyane. Ces travaux effectués à l'initiative de l'organisme, implanté sur place, ont été autofinancés dans la majorité des cas, bien que les documents produits ne le signalent généralement pas. Au cours des deux décennies suivantes, la cartographie s'est étendue aux deux départements antillais, Guadeloupe et Martinique, à la demande de différents services de l'État et de groupements de producteurs qui l'ont en partie financé. Les cartes produites s'accompagnent de notices décrivant les sols, précisant leurs caractéristiques physico-chimiques, leurs contraintes édaphiques et leurs potentialités agricoles.

En Guyane, le climat équatorial est à l'origine d'une intense altération des roches qui conduit à des paysages morpho-pédologiques assez peu diversifiés et caractéristiques des milieux équatoriaux issus de formations du socle précambrien. Les facteurs de genèse des sols sur le socle guyanais sont assez uniformes. Le couvert forestier y est dense et continu, les conditions climatiques sont sensiblement les mêmes et les températures varient très peu. La nature de la roche-mère est en fait le facteur de pédogenèse le plus variable du socle précambrien (Blancaneaux, 1981 ; Lévêque, 1963). Le cas est différent pour la zone alluviale littorale où les éléments de pédogenèse sont l'âge du dépôt d'argiles, le degré de salinité et le drainage. Les deux grands ensembles de sols de Guyane sont donc les sols du socle guyanais et les sols de la plaine littorale.

À l'inverse, les milieux insulaires tropicaux et volcaniques des Antilles et de l'Océan Indien présentent une grande diversité de sols et de paysages liée à celles des matériaux parentaux, à leur âge et aux conditions locales du climat (*Tableau 1*) (Colmet-Daage et Lagache, 1965 ; Quantin *et al.*, 1991 ; Rosello, 1984 ; Riquier et Zebrowski, 1975 ; Zebrowski, 1975). À l'intérieur même de ces petits territoires insulaires, la variabilité des sols est très grande (par ex. à la Martinique, *Tableau 2*). La grande diversité des sols et des paysages y est donc un des traits marquants.

À partir des années 1980-90, on constate à l'IRD un ralentissement des activités pédologiques de prospections et d'inventaires cartographiques. Des chercheurs, de par l'accès aux outils informatiques, se sont alors investis dans une stratégie de sauvegarde et de modernisation des données pédologiques

(Beaudou, 1989). L'objectif était de valoriser les acquis anciens à des fins de conservation des ressources naturelles et de protection de l'environnement tout en fournissant des connaissances aux collègues. Cela s'est traduit par la création de bases de données géoréférencées sols/environnement et de bases de connaissances, permettant une meilleure accessibilité aux données et une large diffusion des informations (Beaudou et Le Martret, 2004 ; Le Martret *et al.*, 2008).

La diversité des échelles des études produites est importante (*Tableau 3*). Aux Antilles les échelles de restitution cartographique sont au 1/20 000^e dans les régions volcaniques, Martinique et Basse-Terre (Colmet-Daage, 1970), à la Guadeloupe des travaux originaux non publiés sont au 1/10 000^e, pour la Grande Terre et Marie Galante (Colmet-Daage, 1968). À La Réunion, dans le cadre des travaux du Cirad, des inventaires au 1/25 000^e des régions peuplées d'altitude sont réalisés par Brouwers et Raunet (1981) et Brouwers (1982a,b). Raunet (1988) propose une cartographie de l'Île de La Réunion au 1/50 000^e. L'île de Mayotte n'a jamais été l'objet d'un inventaire systématique des sols. En Guyane les principaux travaux ont été exécutés au 1/50 000^e. Dans l'ouest du territoire, la complexité et la diversité des organisations morpho-pédologiques ont conduit nos prédécesseurs à proposer des associations de sols pour représenter les unités cartographiques à la même échelle (Turenne et Le Rouget, 1973). Une première synthèse cartographique de ces travaux a été proposée sous forme de base de données (Leprun *et al.*, 2001).

Deux points sont à souligner dans ce contexte historique. D'une part les référentiels taxonomiques des sols sont évolutifs. Ils ont leur caractère particulier dans la mesure où les auteurs proposaient alors des éléments de classification portés par la complexité pédologique rencontrée, qui viendront alimenter la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (C.P.C.S., 1967). Par la suite certains de ces pédologues apporteront leur contribution au Référentiel Pédologique Français (AFES, 2008). Deuxièmement, les profils de sols décrits et analysés sont d'un nombre très variable d'un territoire à l'autre, et les analyses doivent également se lire à l'aune des méthodes appliquées au cours des différentes décennies.

2.2. Les travaux dans le cadre du programme IGCS

Les travaux ont été financés par l'IRD et soutenus sous forme de conventions particulières dans le cadre des appels d'offres IGCS. Deux phases de travaux peuvent être distinguées dans le cadre de cette participation de l'IRD au programme IGCS du GIS Sol (*Tableau 3*). La première concerne l'inventaire des travaux existants de ces territoires ultramarins, leur nature et la mise en production de leur numérisation pour les données cartographiques (avec les outils SIG) et la sauvegarde de données pédologiques et environnementales qui les accompagnent dans

Tableau 2 : Exemple de la complexité pédologique en milieu insulaire. Cartographie des sols de la Martinique par Colmet-Daage (1970), d'après Toulemonde *et al.* (2006).

Table 2: An example of the pedological complexity in island milieu. Martinique's soils cartography by Colmet-Daage (1970), after Toulemonde *et al.* (2006).

Dénomination des sols par Colmet-Daage (1970)		Ensembles cartographiques (légende de la carte)	Surface km ²	Nb d'unités cartographiques	Faciès	Sous-faciès	Associations cartographiques	Sols polyphasés
Sols récents d'apport	Alluvions continentales	A	59,79	385	9	5	30	0
	Colluvions	B	10,28	140	31	4	5	0
	Alluvions marines, marécages	D	20,88	239	5	0	0	0
Sols jeunes sur volcanisme récent	Sols brun-rouille à halloysite	H	62,97	709	4	14	27	16
	Sols peu évolués sur cendres	J	48,17	742	16	0	8	14
	Sols à allophanes sans gibbsite sur cendres et ponces	P	104,30	1043	9	10	23	5
	Sols à allophanes avec gibbsite sur tufs fins	T	87,23	671	6	0	8	10
	Ferrisols compacts	G	113,92	1364	9	1	38	28
Sols évolués de volcanisme ancien	Sols rouges ou bruns à montmorillonite	I	76,97	1111	9	2	37	31
	Intergrades ferrisols-vertisols	K	27,27	482	7	2	10	18
	Sols vertiques et mollisols	N	28,82	486	4	2	6	10
	Sols vertiques calcaires	Nca	0,15	5	1	0	0	0
	Vertisols UDIC	U	6,68	73	3	2	2	4
	Vertisols	V	187,60	3775	5	5	46	19
	Vertisols calcaires	Vca	4,54	131	4	14	0	0
Fortes pentes, zones non cartographiées		Y	227,92	574	/	/	/	/
Zones urbanisées		X	35,61	356	/	/	/	/
Étendues d'eau et rivières			0,26	6	/	/	/	/
Total			1103,37	12302	122	61	240	155

la base de données VALSOL-IRD (Beaudou et Le Martret, 2004). La seconde concerne la réalisation de synthèses pédologiques et leurs restitutions appropriées qui ont été réalisées dans le cadre d'une composante d'IGCS. Ces synthèses pédologiques sont à la base du RRP (Référentiel Régional Pédologique), qui a pour objectif la création d'une base de données sur les sols à l'échelle de la région ou du département. Pour les territoires qui nous intéressent, les synthèses morpho-pédologiques ont été réalisées grâce à l'actualisation des données anciennes sur les sols, en lien avec les données géologiques et morphologiques.

Enfin signalons pour mémoire que les premiers pas d'une

possible intégration des données de la base de données VALSOL-IRD de ces territoires à la base de données DONESOL-INRAE, base de données des sols métropolitains (Grolleau *et al.*, 2004) ont été réalisés en 2021 en vue d'une offre de restitution dans le cadre du GEOPORTAIL (Messant *et al.*, 2021).

Tableau 3 : Inventaire résumé des données historiques et travaux menés dans le cadre du programme IGCS.**Table 3:** Summary of the legacy data and studies developed in the IGCS program.

Territoire	Guadeloupe	Guyane	Martinique	La Réunion	Mayotte
Travaux historiques					
Cartographies réalisées, % superficie	100	13	100	100	0
Inventaires et cartographies, échelles	1/100 000 1/20 000 1/10 000	1/100 000 1/50 000	1/150 000 1/20 000	1/100 000 1/50 000 1/25 000	-
Travaux actuels IRD-IGCS					
Numérisation et sauvegarde 2006-2011	x	x	x	x	-
Synthèses morphopédologiques 2010-2015	x	x	x	x	-
Premiers essais d'intégration de données dans la base de données DoneSol		x			

2.3. Un exemple de sauvegarde des données anciennes : les sols des régions volcaniques de Basse-Terre de Guadeloupe

Les sols des régions volcaniques de Basse-Terre de Guadeloupe sont divisés en deux grands groupes (Colmet-Daage et Lagache, 1965) : (1) les sols résultants de pédogenèses de temps longs, issus de roches mères anciennes (labradorites, andésites, dacites) peu perméables, correspondant principalement à des sols Ferrallitiques (Ferrallitisols), des Ferrisols, des sols intergrades vers les Vertisols (Ferralsols à montmorillonite) et des Vertisols ; (2) les sols résultants de pédogenèses de temps courts, issus de projections volcaniques récentes très perméables, correspondant principalement à des sols sur cendres et ponces, des sols à allophanes (Silandosols) et des sols brun-rouille à halloysites (Nitosols).

La carte des sols de Basse-Terre au 1/20 000^e (Colmet-Daage, 1970) est divisée en 18 feuilles (<https://www.cartographie.ird.fr/sphaera/>). La numérisation finale a été faite après insertion et calage des scans des cartes originales, la digitalisation des polygones, la mise à jour de la légende. La couche de la base de données géographique obtenue, sous forme SIG, compte 5549 polygones et couvre une surface totale d'environ 847 km². De nombreuses cartes peuvent alors être extraites directement à partir de la légende de Colmet-Daage : les ensembles de sols (Figure 2), les sols, les pentes, les propriétés hydromorphes ou encore la densité d'affleurements rocheux.

La répartition des types de sols sur Basse-Terre nous indique que les Ferrallitisols et les sols à allophanes (Andosols) et à halloysites (Nitosols) dominant (Figure 3). La répartition est contrastée en fonction de la morphologie, de la géologie et du climat. Le contraste est illustré par la forte différence pédologique entre la côte au vent, à l'Est, et sous le vent, à l'Ouest, de Basse-Terre (Figure 4). Le versant Ouest est plus

abrupt que le versant Est. Ce transect se situe dans la partie Nord de l'île où les lithologies sont anciennes, la présence de sols vertiques et de Ferrallitisols est cohérente avec l'âge des matériaux les plus anciens précités. Suivant la pluviosité, cela aboutit à des sols vertiques lors de déficits hydriques importants notamment sur la côte sous le vent ou à des sols Ferrallitiques faiblement désaturés, Ferrallitisols meubles kaoliniques (pluviosité moyenne < 2000-2500 mm) ou fortement désaturés en conditions de pluviosité importante (> 2500 mm).

2.4. Un exemple de synthèse morpho-pédologique

Poursuivons notre voyage en Guadeloupe. Ses paysages morpho-pédologiques se dessinent aisément avec les données géologiques, climatiques, géomorphologiques, pédologiques, et de la végétation (Figure 5). Le tableau 4 présente les critères de détermination pour délimiter les grands paysages de la Guadeloupe. Les zones dominées par les roches calcaires (Grande-Terre, Petite-Terre) se distinguent des zones volcaniques (Basse-Terre et les Saintes) sauf pour la Désirade où affleurent les deux types de roches. Le paysage de plaines alluviales et de marécages fait le lien entre les îles de Basse-Terre et de Grande-Terre. Les grands paysages reprennent en partie les paysages géomorphologiques pour la Grande-Terre principalement et en partie pour Basse-Terre mais leurs limites se précisent grâce aux cartes pédologiques et géologiques.

À titre d'exemple nous détaillons le GP10 :

- Localisation : sur l'axe montagneux de Basse-Terre, du Nord à la Pointe Allègre au Sud. Il est limité à l'Est par le « Grand Paysage de versant Sec » à 200 m (GP9) et à l'Ouest par la « Plaine » à partir de 100 m d'altitude. Il se divise en deux unités paysages :

- Au Nord, paysage septentrional de relief ancien, GP10_1 ;
- Au Sud, paysage de la chaîne axiale plus récent, GP10_2.

Figure 2 : Carte numérisée des Ensembles de sols de Basse-Terre (Guadeloupe) à 1/20 000°, légende selon Colmet-Daage (1970) (Dupuits-Bonin et al., 2015).

Figure 2: Digital Map of soils groups of the Basse-Terre (Guadeloupe) at 1/20,000 scale, legend after Colmet-Daage (1970) (Dupuits-Bonin et al., 2015).

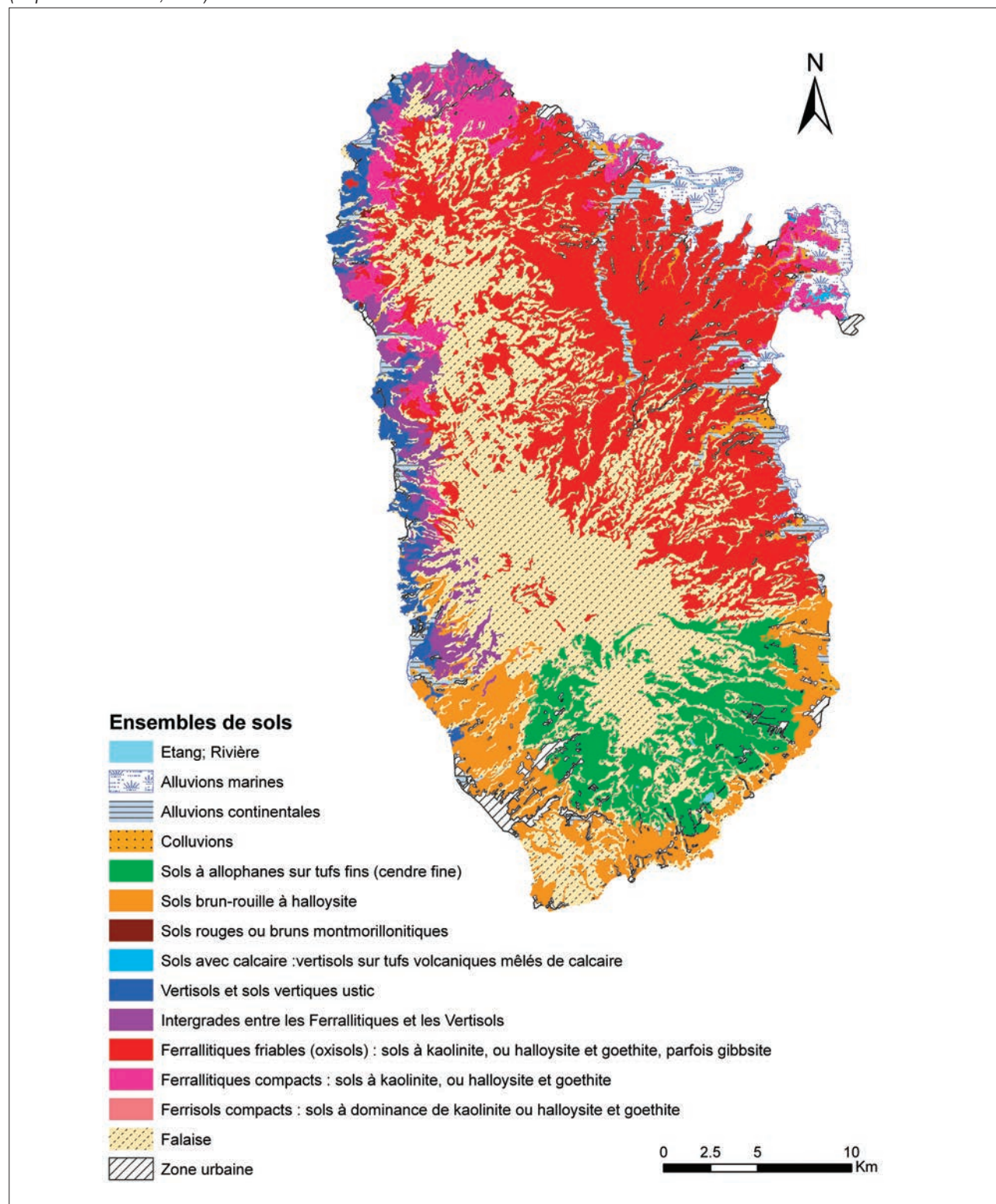


Figure 3 : Répartition surfacique des types sols de Basse-Terre réalisée à partir de la base de données SIG (Dupuits-Bonin *et al.*, 2015).

Figure 3: Soils type surface distribution in Basse-Terre obtained with the GIS data base (Dupuits-Bonin *et al.*, 2015).

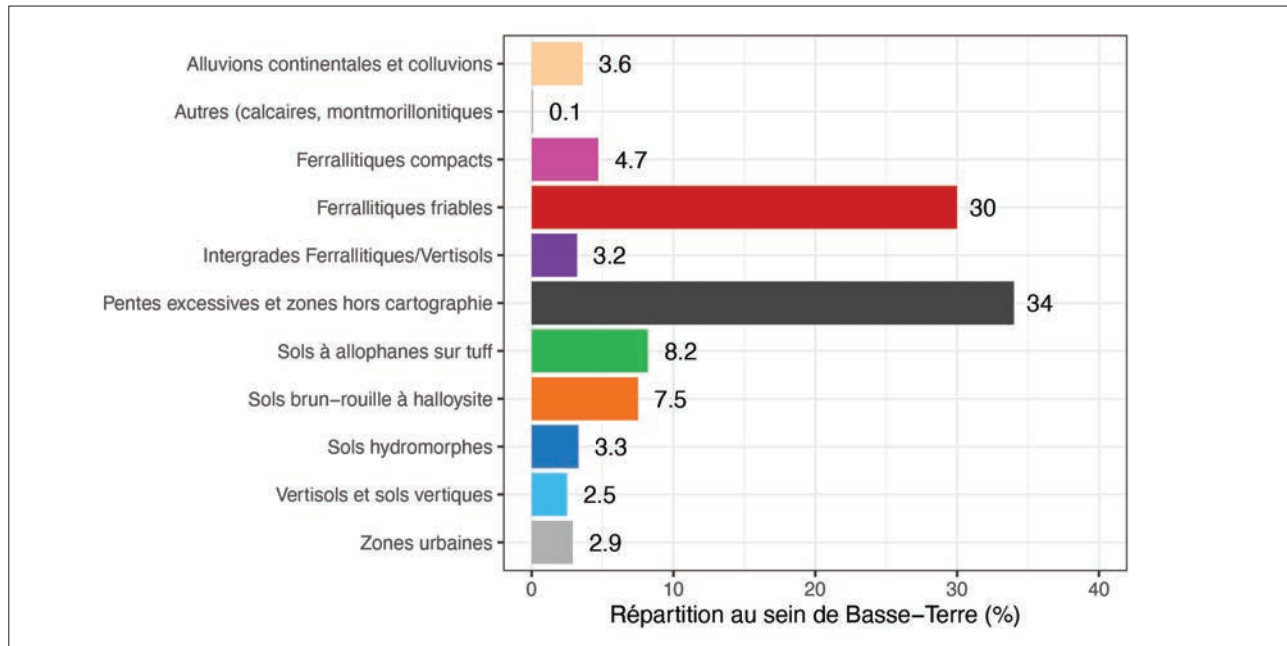


Figure 4 : Transect pédologique synthétique Ouest/Est au nord de Basse-Terre en Guadeloupe (Dupuits-Bonin *et al.*, 2015). (Échelles d'altitude et de distance en m, Carrés bleus Pluviosité en mm/an).

Figure 4: Synthetical pedological transect W/E in the north of Basse-Terre in Guadeloupe (Dupuits-Bonin *et al.*, 2015). (Altitude and distance scales in m. Blue squares rainfall level in mm/year).

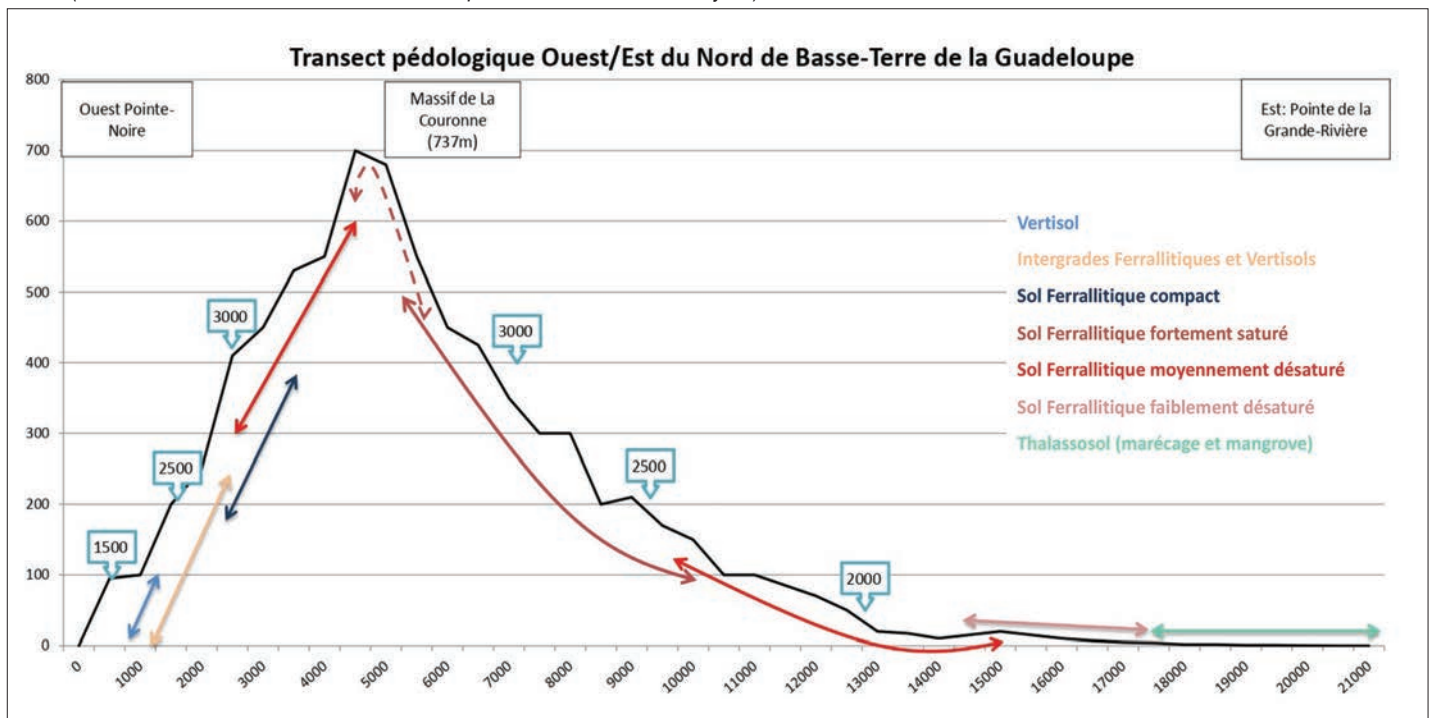
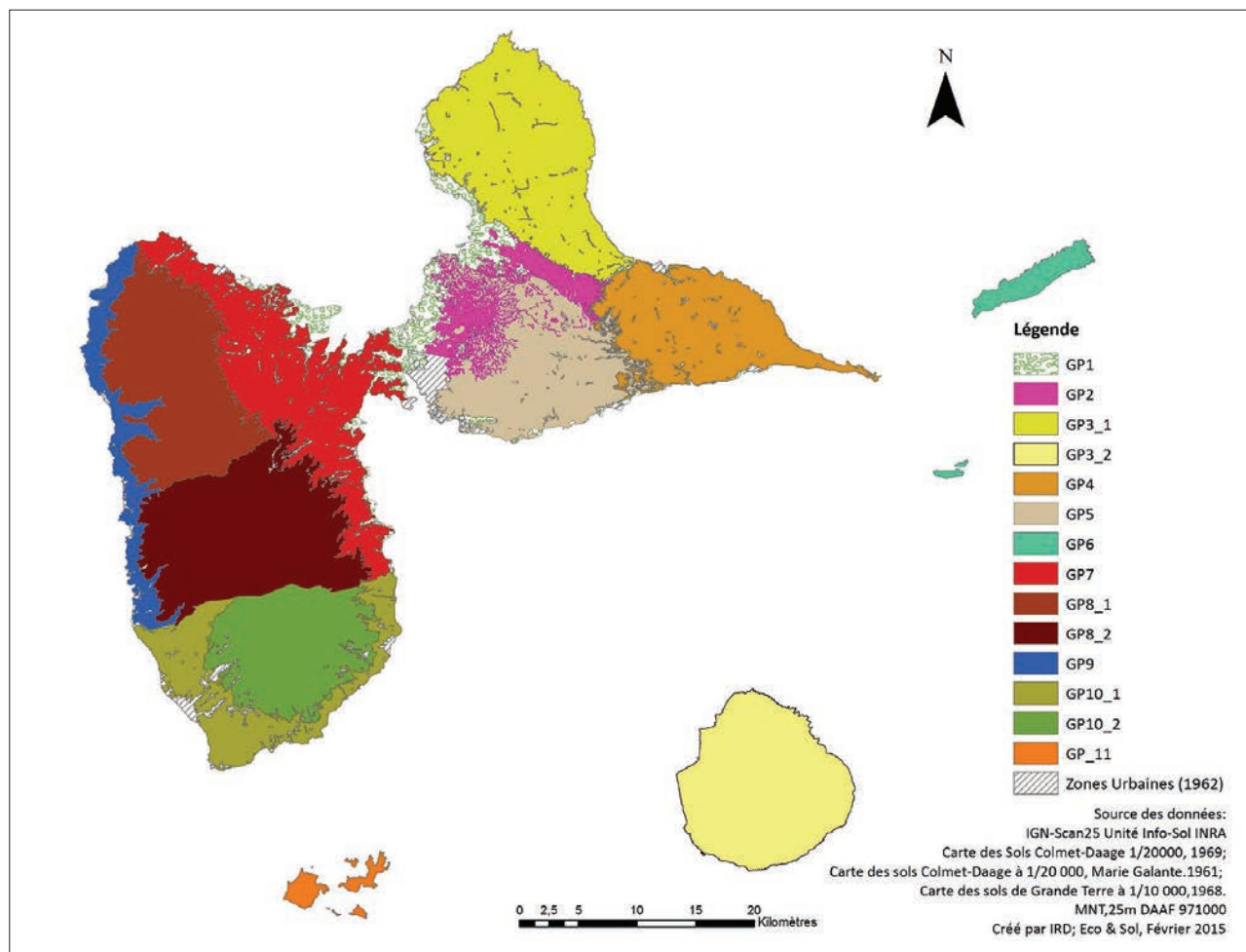


Figure 5 : Carte des grands paysages (GP) et paysages (ex. _1 dans GP10) de la Guadeloupe (Dupuits-Bonin et al., 2015).

Figure 5: Map of Guadeloupe landscapes, first (GP) and second (ex. GP10_1) order.



- **Formations géologiques:** du nord au sud, (i) le complexe basal mis en place entre 2,8 et 2,7 Ma, puis (ii) la chaîne septentrionale mise en place entre 1,8 et 1,15 Ma, délimitée au sud par la dépression des Deux Mamelles, qui se compose de laves en planèzes disséquées et de coulées pyroclastiques, et enfin (iii) la chaîne axiale d'âge compris entre 1 et 0,6 Ma, où les roches sont constituées de coulées massives d'andésites et de projection pyroclastiques.

- **Géomorphologie:** le grand paysage de relief de l'île de Basse-Terre présente des versants à pentes fortes (souvent supérieures à 15 %) qui sont largement entaillés par de nombreuses rivières. L'altitude est plus faible et le relief est plus doux au Nord qu'au Sud, ce qui est dû à l'ancienneté des matériaux.

- **Climat:** le climat est tropical humide (de 2500/3000 à 4500 mm/an en moyenne). La partie sud de la zone est plus pluvieuse que la partie nord (environ 1000 mm de plus). La végétation se compose essentiellement de deux étages. Le

premier correspond à un étage de forêt tropicale hygrophile compris entre 500 m et 1100 m d'altitude avec une pluviosité variant de 3000 à 5000 mm/an. La forêt est caractérisée par sa densité importante de plantes et une structure particulière où les strates sont nombreuses et présentent une grande richesse floristique (Imbert et Portecop, 2008 ; Trouvilliez et Mortier, 2011). Le second étage, au-dessus de 1100 m d'altitude, correspond à l'étage tropical de montagne, qui bénéficie de la pluviosité la plus importante de l'île, où l'humidité est comprise entre 90 et 100 % tout au long de l'année entretenue par un ennuagement quasi permanent.

- **Sols (Figure 6):** au sein du grand-paysage se développent les Ferrallitisols à halloysite, et les sols à allophanes avec ou sans gibbsite (Vitrandosol, Silandosol). Les sols à allophanes se développent sur les dépôts récents de tufs fins. Les sols à halloysite forment une ceinture bien développée dans les reliefs les plus anciens.

Tableau 4 : Critères de délimitation des grands paysages de Guadeloupe.**Table 4:** First order landscape criteria delimitation for Guadeloupe.

Identifiant Grand Paysage	Grands Paysages	Critère principal de détermination	Critère de détermination 2	Critère de détermination 3
GP1	Paysage de mangrove de Basse-Terre et de Grande-Terre	Végétation	Origine de la roche mère	
GP2	Plaines argileuses de l'Ouest de Grande-Terre	Morphologie du paysage	Origine de la roche mère et type de sol	
GP3	Plateaux calcaires du Nord de Grande-Terre et de l'Île de Marie-Galante	Morphologie du paysage	Climat/Végétation	Age des matériaux, type de sol
GP4	Plateaux calcaires du Sud-Est de Grande-Terre	Morphologie du paysage	Climat/Végétation	Age des matériaux, type de sol
GP5	Les Grands-Fonds de Grande-Terre	Morphologie du paysage	Origine de la roche mère	
GP6	Plateau calcaire surplombant le complexe volcanique de la Désirade	Morphologie du paysage	Origine de la roche mère	
GP7	Plaines du Nord-Est de Basse-Terre	Age des matériaux	Type de sol	Morphologie du paysage
GP8	Le massif volcanique de la Grande-Découverte et les Monts Caraïbes de Basse-Terre	Age des matériaux	Type de sol	Morphologie du paysage (GP8_1 et GP8_2)
GP9	Paysage des versants secs sous le vent de la côte Est de Basse-Terre	Age des matériaux	Climat/Végétation	
GP10	Grand Paysage de relief de Basse-Terre	Age des matériaux	Type de sol	Morphologie du paysage (GP10_1 et GP10_2)
GP11	L'archipel volcanique des Saintes	Age des matériaux	Morphologie du paysage	

2.5. Quelques exemples d'application de ces travaux

Les données géoréférencées ont été utilisées dans le sud de la Martinique où sont très largement développés les sols à argiles gonflantes. À la demande du département en charge du développement du réseau de fibres optiques, une expertise a été engagée. La contrainte mise en avant par le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage était de déterminer les profondeurs de passages de fibres. Nous avons alors fourni les profondeurs d'apparition des lithologies, l'épaisseur des sols et la distribution des pentes.

En 2016, la Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF) de la Guadeloupe a mis à jour sa base de données des potentialités agricoles et s'est appuyée sur la base de données pédologiques (https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/carte-des-terres-agricoles-valorisables-a29.html?id_rubrique=144).

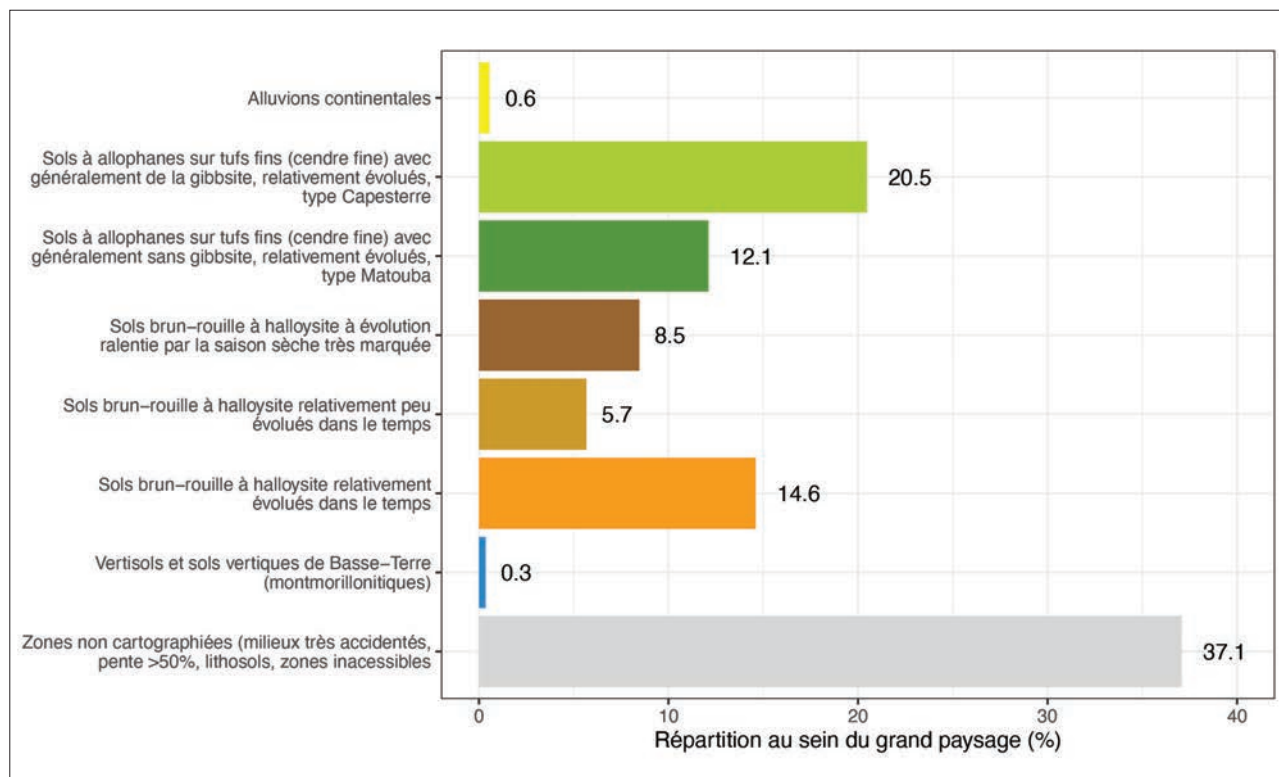
En Guyane, la Chambre d'agriculture a utilisé la base de données pour cerner le choix de sites de mise en place d'expérimentations des boues de Stations d'épuration des eaux usées (STEP).

À La Réunion, la base de données a été utilisée par l'équipe Cirad-IRD dans le cadre des études sur le carbone du sol (Todoroff *et al.*, 2019).

Signalons également l'utilisation de la base de données VALSOL pour l'expertise pédologique concernant la définition des « zones défavorisées simples » à la demande du Ministère en charge de l'agriculture.

3. UNE PREMIÈRE CAMPAGNE DU PROGRAMME RMQS

Le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) a été implanté en France métropolitaine à partir de l'année 2000. Ce programme de surveillance des sols consiste à analyser tous les 15 ans les propriétés des sols sur près de 2000 sites répartis de façon homogène. À partir de 2006, ce réseau s'est étendu à plusieurs territoires ultramarins. La taille de la maille permettant la création de cellules au sein desquelles ont été implantés les sites est la même que pour la métropole, 16x16 km, sauf pour Mayotte où une maille de 10x10 km a été utilisée.

Figure 6 : Répartition des sols du grand paysage GP10.**Figure 6: Soils distributions in the landscape GP10.**

Soixante-sept sites ont ainsi été implantés pour la première campagne du RMQS en Outre-mer (Figure 7): 10 sites à la Guadeloupe (2006), 8 à la Martinique (2007), 13 à La Réunion (2013), 3 à Mayotte (2013), et 33 sur la bande côtière de la Guyane (2014 et 2015). Cette première campagne a été menée par l'unité InfoSol d'INRAE Orléans, en collaboration avec INRAE de Guadeloupe pour les sites des Antilles, INRAE Dijon à la Martinique, l'IRD (UMR Eco&Sols) pour les sites de la Martinique, de La Réunion, de Mayotte, et de la Guyane, le Cirad à La Réunion, et la DAAF à Mayotte. Dans cette section sont présentés la méthodologie du RMQS ultramarin, les caractéristiques des 67 sites implantés en Outre-mer lors de la première campagne, quelques résultats marquants, et une discussion sur l'évolution du réseau, notamment au regard de la représentativité des sites dans les territoires insulaires.

3.1. Méthodologie : implantation des dispositifs, échantillonnage et analyses

La méthodologie employée pour implanter les sites, l'échantillonnage et les analyses de sols réalisées dans le cadre du RMQS est similaire entre les sites d'Outre-mer et de l'Hexagone et la Corse, et est décrite pour la première

campagne par Jolivet *et al.* (2006). Concernant l'implantation des sites, brièvement, une fois la localisation du site déterminée, une zone d'échantillonnage de forme carrée est délimitée, au sein de laquelle est prélevée un échantillon composite de sol. Une fosse est creusée à l'extérieur de ce carré, où le sol est décrit et des échantillons prélevés dans chacun des horizons du profil de sol.

Quelques adaptations de la méthodologie ont cependant été nécessaires dans certaines situations. L'implantation de la zone d'échantillonnage à l'aide d'appareils GPS a parfois été difficile, en raison de l'absence de correction en temps réel dans certains territoires. Dans ces situations, la correction des levés a été faite à l'aide de données relevées sur des stations permanentes, et en l'absence de stations permanentes (comme à Mayotte), des levés en parallèle ont été effectués en utilisant une borne IGN de coordonnées connues.

Dans les sites forestiers de Guyane, il est difficile d'implanter une zone d'échantillonnage de forme carrée. Des dispositifs en étoile ont été mis en place, et des marqueurs passifs ont été installés sur ces sites afin de faciliter leur réimplantation.

Le menu analytique est similaire entre les sols de l'Hexagone et des Outre-mer, mais quelques différences notables sont à mettre en exergue. Les analyses sont classiquement réalisées

sur des échantillons de sols séchés à l'air; or ce séchage à l'air peut altérer de façon irréversible les propriétés physico-chimiques des Andosols. Pour cette raison, les analyses physico-chimiques réalisées sur les Andosols prélevés à La Réunion (9 sites sur 13) et à la Guadeloupe (2 sites sur 10) ont été réalisées sur des échantillons de sol frais. Ces analyses sur échantillons frais n'avaient pas pu être effectuées pour la campagne à la Martinique (un site concerné, *Tableau 4*). Le menu analytique concernant les contaminants est également adapté au contexte local. Des analyses des teneurs en chlordécone sont en cours de réalisation sur les échantillons des Antilles.

Enfin, les échantillons de sol du RMQS Outre-mer ne peuvent être archivés de la même manière que les échantillons de sols de l'Hexagone. Les échantillons de sols tropicaux sont en effet soumis à une réglementation spécifique, imposant que ces échantillons soient stockés et analysés par des laboratoires habilités à traiter des échantillons de sols nécessitant une mesure de quarantaine (niveau L2). Contrairement aux échantillons du RMQS de l'Hexagone qui sont archivés au CEES (Conservatoire Européen des échantillons de Sols) à Orléans, les échantillons des Antilles, de La Réunion et de Mayotte sont ainsi archivés à la pédothèque confinée de l'Unité Eco&Sols à Montpellier, tandis que les échantillons de Guyane sont actuellement conservés au centre IRD de Cayenne.

3.2. Mode d'occupation et typologie des sols du RMQS en Outre-mer

La distribution des modes d'occupation des sols dans le réseau présente une grande différence avec ceux rencontrés dans l'Hexagone. Les surfaces agricoles dans le RMQS en Outre-mer sont souvent consacrées à des cultures pérennes (vergers), des cultures de cycles pluriannuels (bananeraies, canne à sucre) ou à des prairies pâturées (*Figure 7*). Les successions culturales sont peu représentées et concernent la plupart du temps des parcelles de canne à sucre ou en jachère. Des systèmes de cultures spécifiques à certains territoires sont également représentés dans le réseau, tels que les abattis-brûlis (cultures vivrières et production spécifique de manioc) dans l'ouest de la Guyane. Quelques sites ont été implantés dans des milieux naturels, c'est-à-dire des écosystèmes non exploités (par exemple prairie naturelle, savane, mangrove). Enfin, près de la moitié des sites sont situés sous forêt ($n = 32$), dont 23 en Guyane; de nombreux sites forestiers en Outre-mer sont naturels ou semi-naturels.

Les sols rencontrés dans les sites du réseau sont développés sur des matériaux volcaniques, plutoniques, et même calcaires (sols de Grande-Terre en Guadeloupe). Combiné à une importante variabilité du climat à l'échelle régionale dans ces territoires et à des âges de la pédogénèse qui varient du millier d'années (dépôts récents des volcans insulaires) à quelques milliards d'années (socle précambrien

Figure 7 : Localisation et mode d'occupation des sites de la première campagne du RMQS en Outre-mer.

Figure 7: Sites Location and land cover from first campaign of RMQS in French overseas.

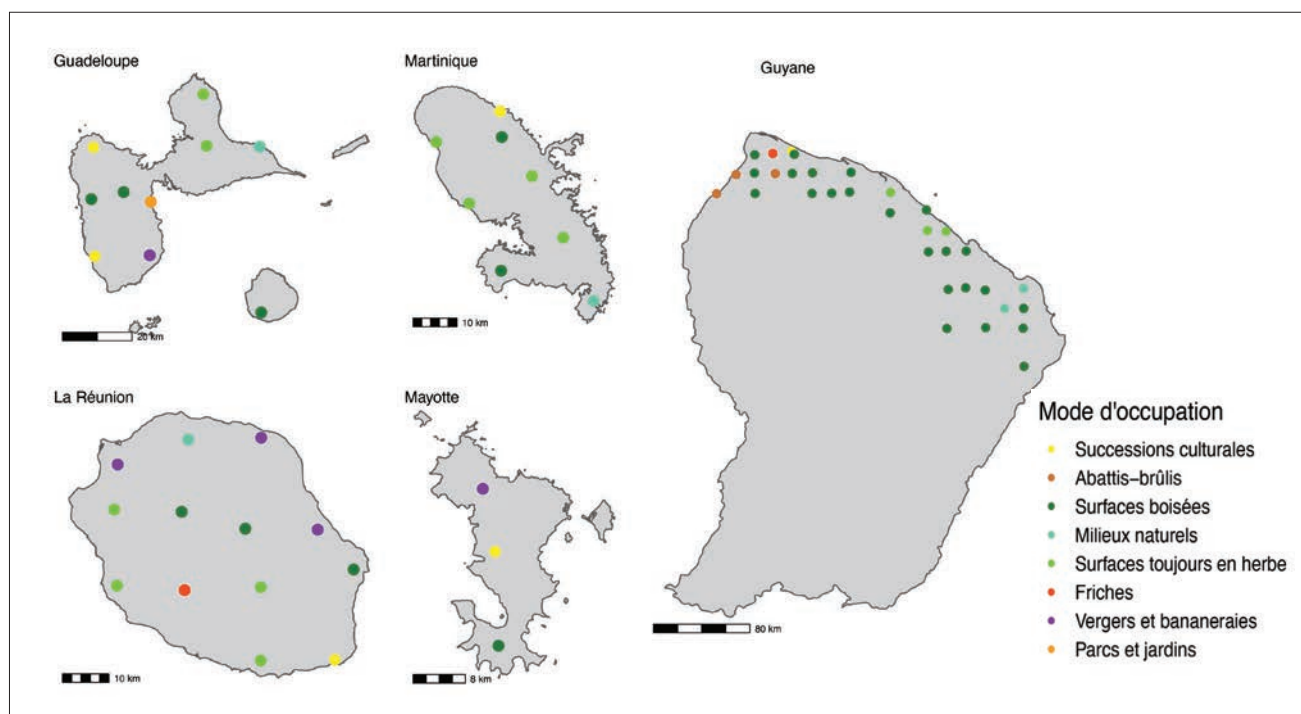


Tableau 5 : Principaux Grands Ensembles de Références de sols (Référentiel Pédologique, 2008) échantillonnés au cours de la première campagne du RMQS en Outre-mer.

Table 5: Main soil types (Référentiel Pédologique, 2008) sampled in the first RMQS campaign in French overseas.

Territoire	Grands Ensembles de Références	Nombre de sites
Guadeloupe	Calcisols et Calcosols	2
	Vertisols	2
	Nitisols	1
	Ferrallitisols	3
	Andosols	2
Martinique	Vertisols	2
	Nitisols	1
	Ferrallitisols	2
	Andosols	1
	Regosols	1
	Rankosol	1
La Réunion	Andosols	6
	Vitrandosol	1
	Colluviosol	1
	Fluviosol	1
	Brunisols	3
	Nitisols	1
Mayotte	Ferrallitisols	3
Guyane	Ferrallitisols	21
	Rédoxisols	5
	Réductisols	2
	Fluviosols	2
	Podzosols	1

en Guyane) (Tableau 1), les sols du RMQS en Outre-mer présentent une grande diversité, où la plupart des types de sols tropicaux sont représentés (Tableau 5 et Figure 8). On retrouve ainsi des sols développés sur des matériaux volcaniques à des degrés croissants d'évolutions pédogénétiques : Régosols pyroclastiques aux premiers stades de la pédogenèse, qui peuvent évoluer vers des Brunisols ou des Nitisols à halloysite et des Andosols à allophanes selon les conditions climatiques locales. Les Ferrallitisols se développent sur les matériaux volcaniques les plus anciens. Les sols aux propriétés vertiques en Outre-mer peuvent être issus de matériaux volcaniques (côte sous le vent à climat contrasté et moins pluvieuses, Figures 2 et 4) ou sédimentaires, dans des régions où le climat subhumide entraîne la formation de smectites (Vertisols à la Martinique, Vertisols, Calcisols et Calcosols en Guadeloupe). Enfin, les sols des sites de Guyane sont dominés par les Ferrallitisols, typiques des pédogenèses anciennes sur des roches plutoniques sous climat chaud et humide, mais les conditions topographiques peuvent aussi entraîner la formation de sols hydromorphes (Réductisols et Rédoxisols).

Figure 8 : Environnements et profils de sols sur quelques sites du RMQS en Outre-mer [auteurs des clichés : C. Jolivet (Martinique, Mayotte) et M. Brossard (La Réunion, Guyane)].

Figure 8: Environments and soil profiles in several RMQS sites in French overseas [credits: C. Jolivet (Martinique, Mayotte) and M. Brossard (La Réunion, Guyane)].

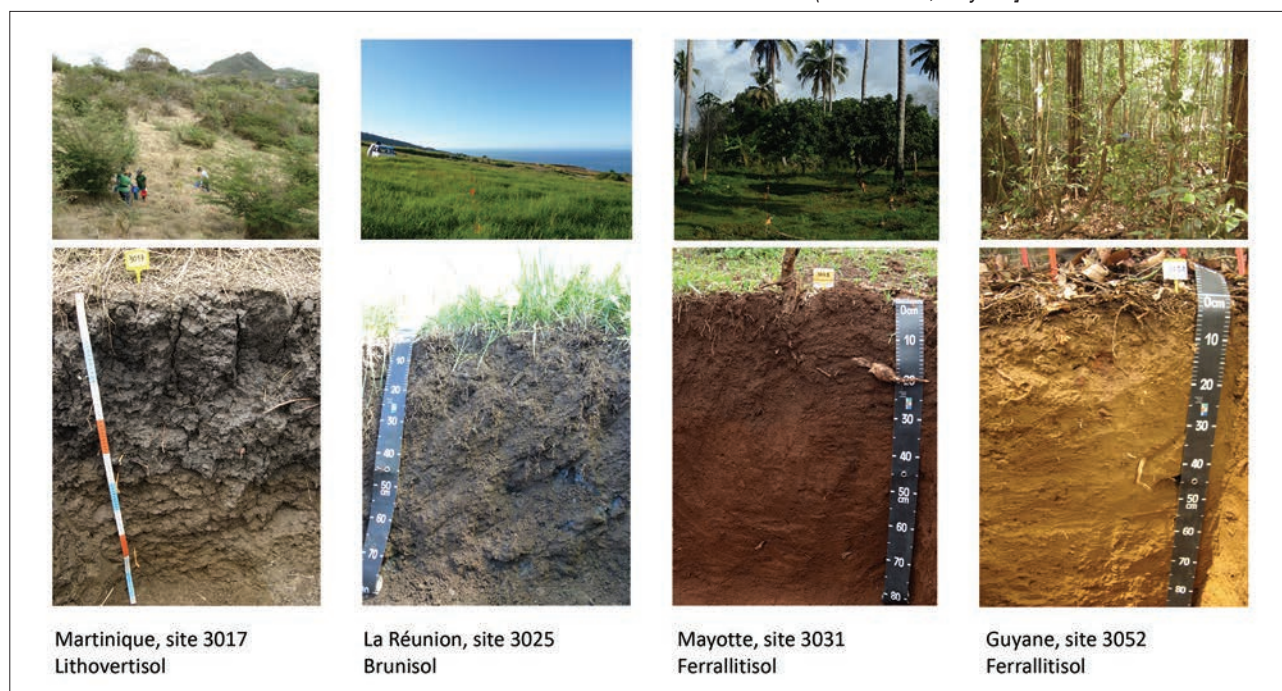


Figure 9 : Teneurs totales en ETM des sites du RMQS en Outre-mer dans la couche de surface des sols (0-30 cm).

Figure 9: Total content in trace metals from overseas RMQS sites in the soil surface layer (0-30 cm).

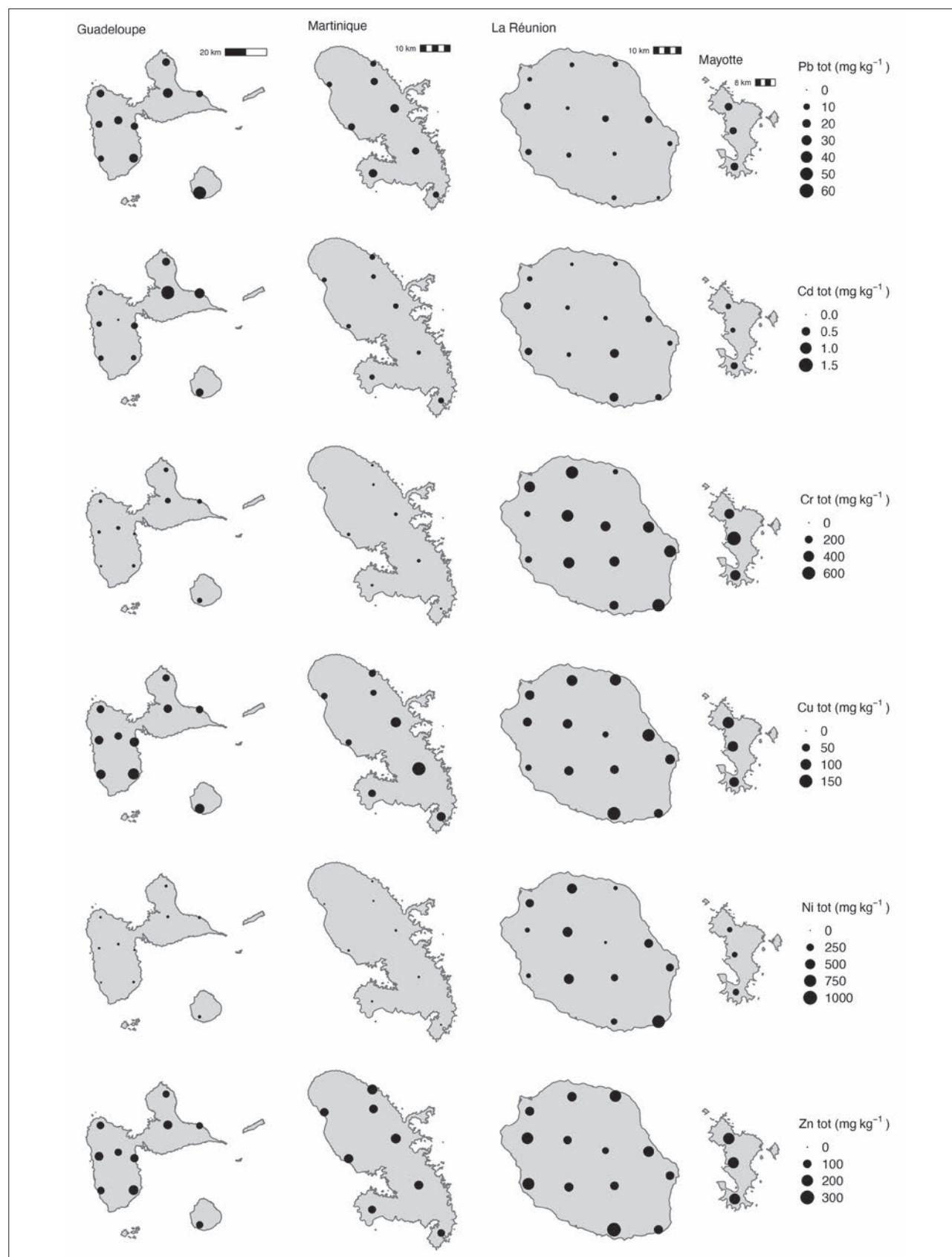
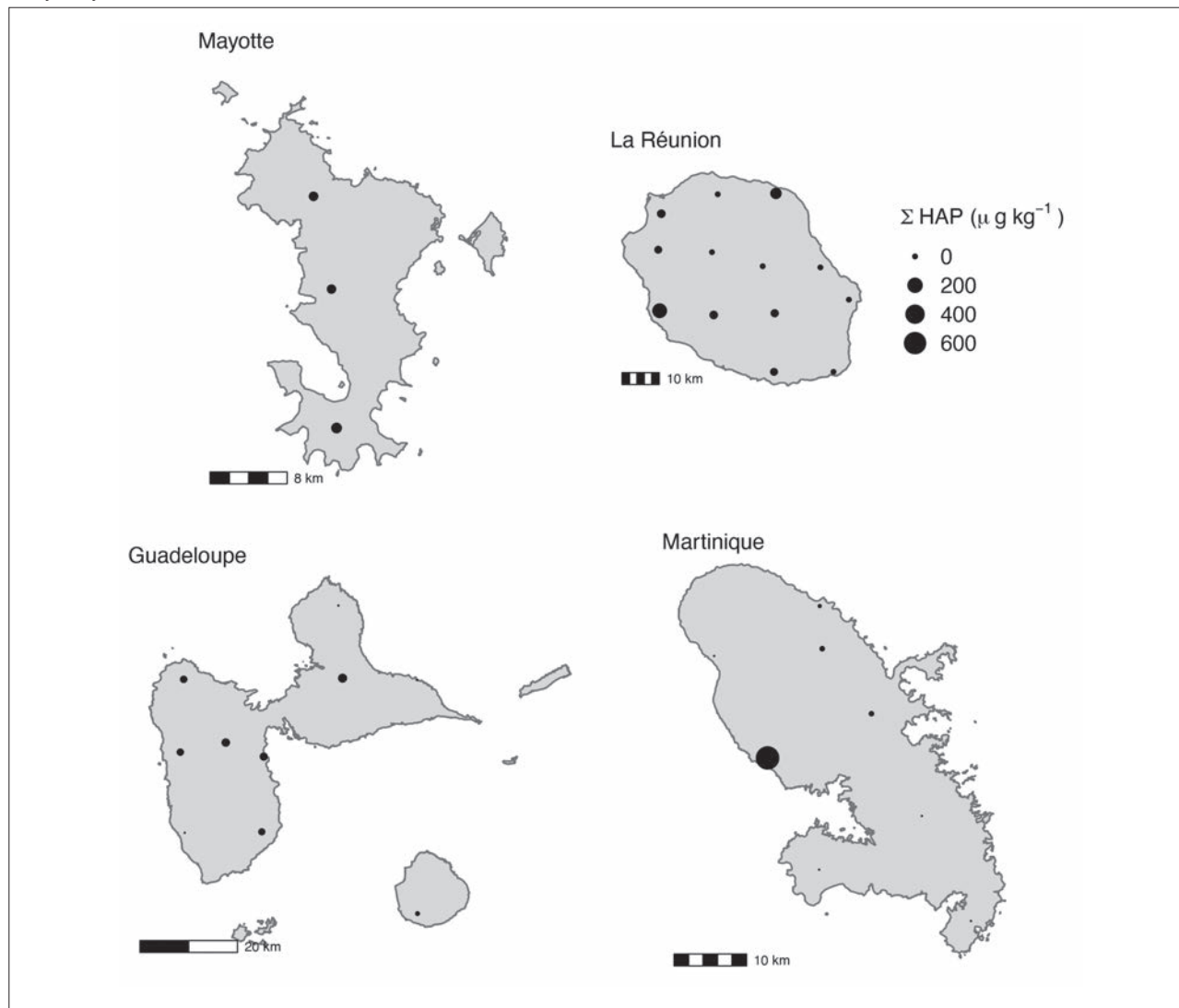


Figure 10 : Teneurs en HAP (somme de 15 molécules) de la couche 0-30 cm des sols du RMQS en Outre-mer. Q25 et Q75 correspondent respectivement au 1^{er} et 3^e quartiles des données. Voir Froger et al. (2021) pour le détail des molécules analysées. La Guyane n'apparaît pas dans cette figure car les données n'ont pas encore été analysées.

Figure 10: PAH contents (sum of 15 molecules) in layer 0-30 cm from overseas RMQS sites. Q25 and Q75 are respectively the first and third quartiles. See Froger et al. (2021) for the analyzed molecules. French Guiana was not included in this figure since data were not analyzed yet.



3.3. Quelques résultats issus du RMQS Outre-mer

3.3.1 Éléments traces métalliques et hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les analyses de contaminants réalisés sur les échantillons de sols permettent de dresser des cartogrammes des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les données sont actuellement

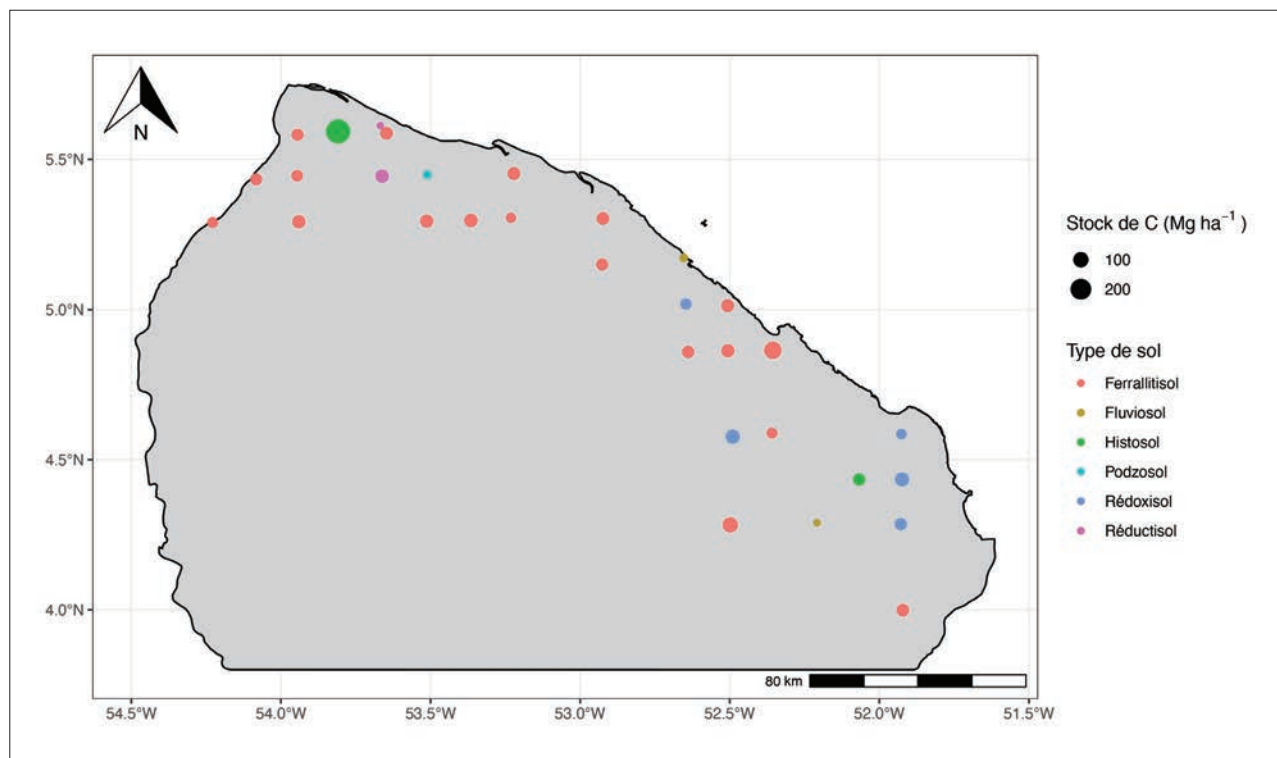
disponibles pour les Antilles, Mayotte et La Réunion. Pour les sols de Guyane, les analyses ont été réalisées mais les données n'ont pour l'instant pas été saisies.

Les teneurs en ETM mesurées dans la couche 0-30 cm montrent des disparités entre certains territoires, qui peuvent être expliquées par la nature des matériaux parentaux des sols (Figure 9).

Par exemple, les teneurs les plus élevées en cadmium sont observées dans les sols de Grande-Terre en Guadeloupe, développés sur des calcaires récifaux; cette tendance est

Figure 11 : Cartogramme des stocks de carbone du sol (couche 0-30 cm) sur les sites RMQS de Guyane.

Figure 11: Soil carbon stocks (layer 0-30 cm) cartogram in the French Guiana RMQS sites.



également observée dans l'Hexagone, avec des teneurs en cadmium les plus élevées observées dans des régions calcaires (GIS Sol, 2011). Les teneurs en Ni et Cr sont les plus élevées pour les sites de La Réunion (en particulier dans les Andosols) et Mayotte, et du même ordre que celles reportées par (Doelsch *et al.*, 2006) à La Réunion. Ces auteurs indiquent que ces teneurs élevées sont d'origine naturelle, les matériaux parentaux volcaniques contenant des proportions notables d'ETM. Les teneurs en Cu sont assez élevées dans les quatre territoires, au-delà de 50 mg kg⁻¹, en raison des matériaux parentaux volcaniques naturellement riches en Cu.

Ces résultats ne montrent pas de contamination d'origine anthropique des sites du RMQS en Outre-mer par les ETM. L'importance du fond géochimique dans la variabilité des concentrations en ETM de sites RMQS avait été mise en évidence dans le cas du Vanadium aux Antilles, qui est un marqueur des éruptions volcaniques passées (Cabidoche et Brossard, 2009).

Les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ont été mesurés. Ces contaminants organiques sont dispersés dans l'environnement suite à la combustion incomplète de composés organiques (bois, charbon, pétrole), et ont des origines variées (feux, industries, gaz d'échappement automobiles). Les teneurs en HAP sont exprimées ici en additionnant les teneurs de 15 molécules, de façon analogue aux travaux réalisés dans

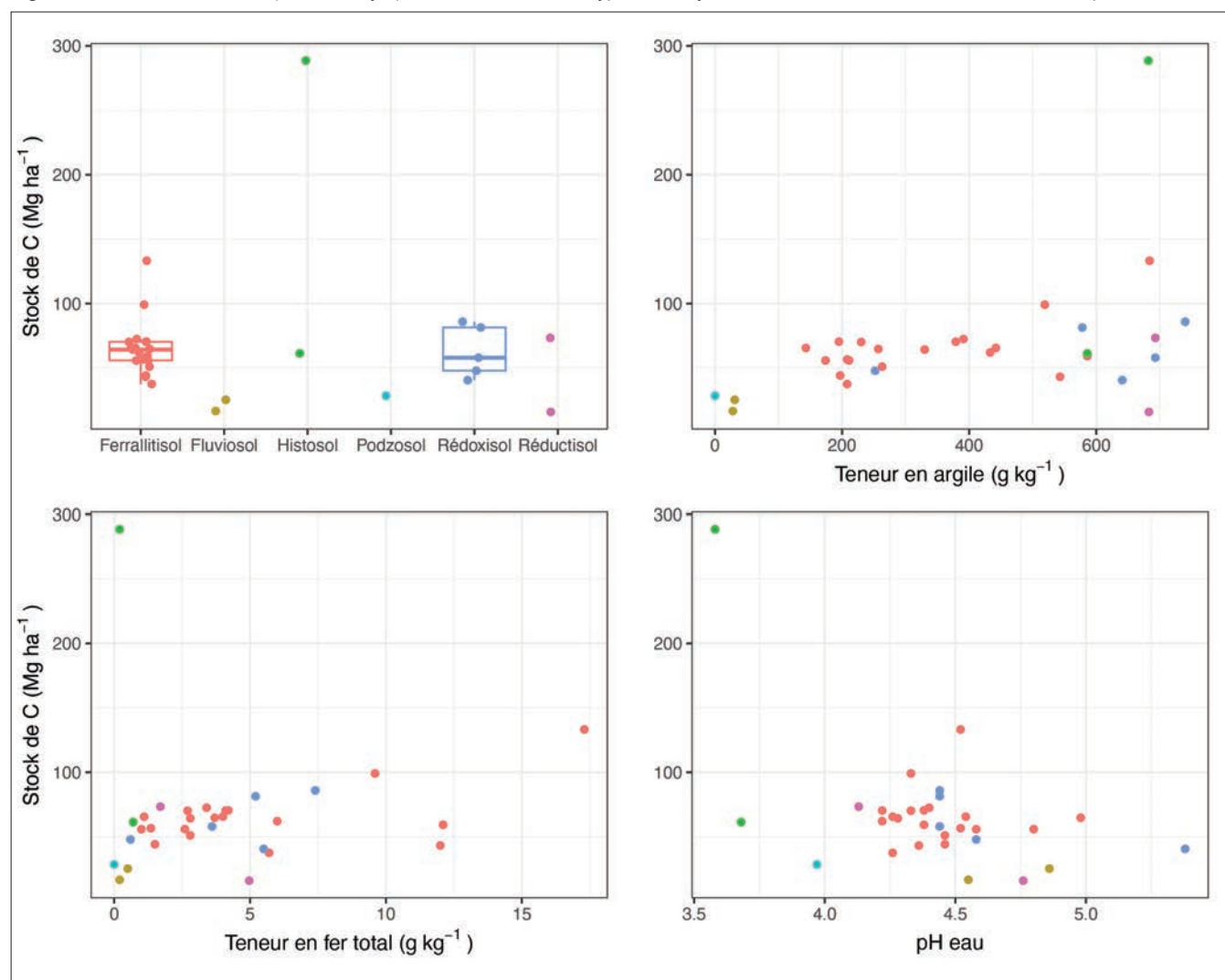
l'hexagone (Froger *et al.*, 2021). Les teneurs en HAP sont dans l'ensemble peu élevées pour les quatre territoires insulaires, avec une médiane de 12 µg kg⁻¹ dans la couche superficielle 0-30 cm (Figure 10). Avec ces teneurs, les sols ne sont pas considérés comme contaminés (Maliszewska-Kordybach, 1996) ; à titre de comparaison, la teneur médiane en métropole est de 33 µg kg⁻¹ (Froger *et al.*, 2021). Le site ayant la teneur en HAP la plus élevée (686 µg kg⁻¹) est situé à la Martinique (Figure 10). Ce site peut être considéré comme contaminé (Maliszewska-Kordybach, 1996), avec une origine de la contamination probablement urbaine compte tenu de la proximité avec Fort-de-France, située à quelques kilomètres à l'est du site, et sous le vent de la raffinerie de la Baie de Fort-de-France.

3.3.2 Stocks de carbone des sols en Guyane

Les données de stocks de carbone (C) du sol des sites RMQS en Guyane ont été utilisées pour réaliser la cartographie des stocks de C (couches 0-30, 0-50 et 0-100 cm) de la bande côtière de Guyane dans le cadre du projet CarSGuy (Brossard *et al.*, 2018). Ces données ont été intégrées à un jeu de données comprenant des données anciennes issues de travaux de cartographie des sols en Guyane et d'un inventaire récent. Les stocks de C du sol dans la couche 0-30 cm mesurés sur les sites RMQS présentent une amplitude importante, entre 16 et

Figure 12 : Stocks de C du sol (0-30 cm) sur les sites RMQS de Guyane selon le type de sol, la teneur en argile, la teneur en fer total, et le pH mesuré dans l'eau.

Figure 12: Soil carbon stocks (0-30 cm layer) in function of the soil type, the clay content, the total iron content and the water pH.



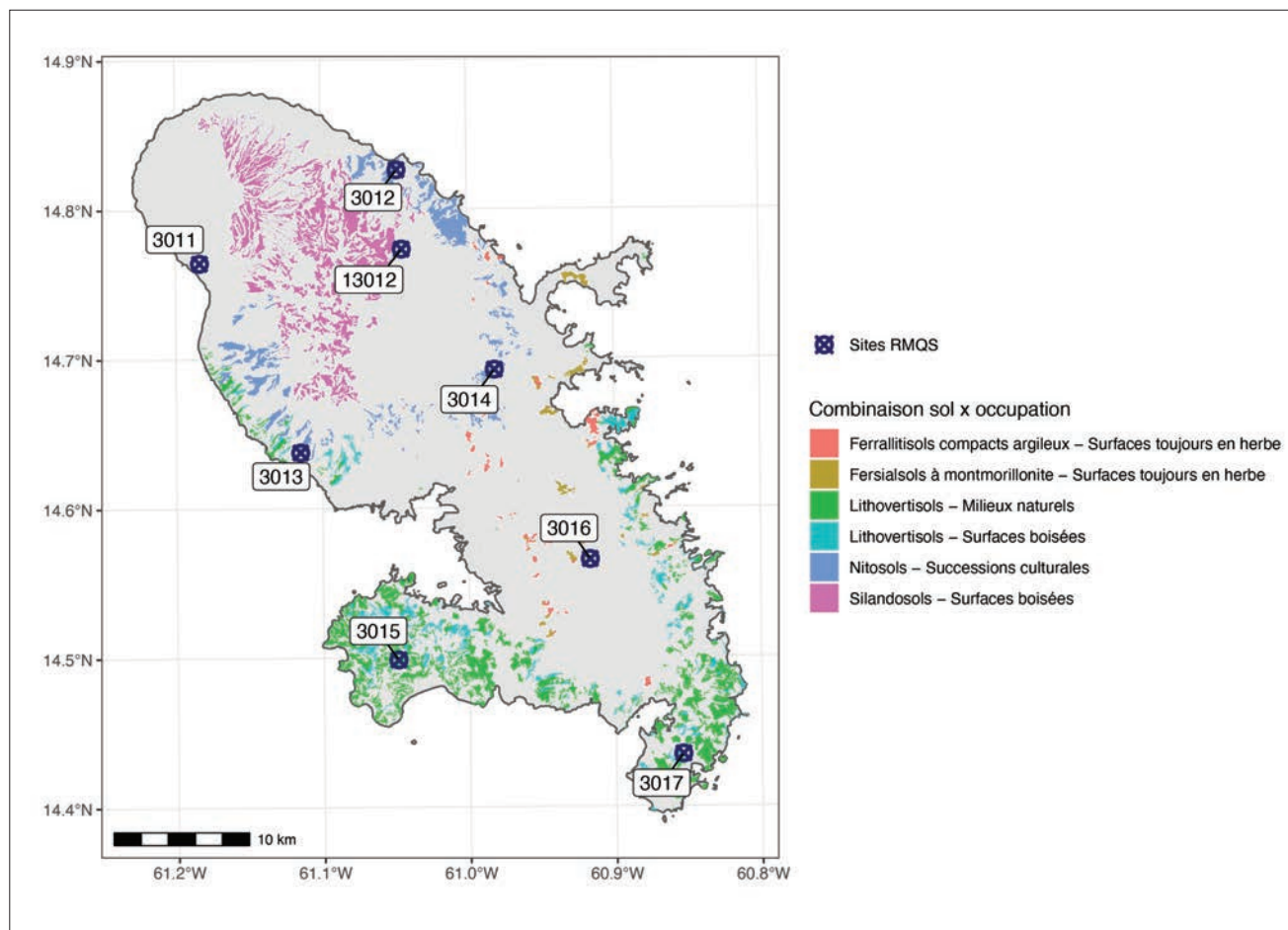
289 Mg C ha⁻¹, et une médiane de 61 Mg C ha⁻¹ (Figures 11 et 12). Hormis la valeur de stock la plus élevée qui peut s'expliquer par le type de sol, un Histosol, il est difficile avec le jeu de données actuel de mettre en avant les déterminants importants de stocks de C dans les sols du RMQS en Guyane (Figure 12). Une relation positive entre la teneur en argile et les stocks de C aurait pu être attendue dans le cas des Ferrallitols car elle est observée à l'échelle du biome amazonien (Quesada et al., 2020). Cependant, peu de Ferrallitols du RMQS en Guyane contiennent plus de 50 % d'argile, rendant délicate l'analyse de cette relation. L'analyse ultérieure des relations entre teneur ou stocks de C et les teneurs en oxy-hydroxydes

de fer et d'aluminium, non disponibles actuellement, pourrait apporter des éléments explicatifs de la variabilité des stocks de C, comme l'ont montré Quesada et al. (2020).

3.4. Évolution du RMQS et représentativité des sites

3.4.1. Évolution du réseau

Plusieurs axes d'amélioration sont actuellement envisagés afin de renforcer l'efficacité du RMQS Outre-mer pour suivre l'évolution des propriétés des sols.

Figure 13 : Combinaisons sol - occupation associées aux sites RMQS à la Martinique.**Figure 13:** *Combinaisons soil - land use associated with the RMQS sites in Martinique.*

Le premier point est l'amélioration de la couverture du réseau dans ces territoires, adaptée à leurs contextes. En Guyane, la couverture actuelle du réseau est limitée à la bande côtière : une extension du réseau vers l'intérieur de la Guyane est donc envisagée, en particulier sur les régions à forte pression humaine, par exemple le long des fleuves Maroni et Oyapock. La maille de 16x16 km serait conservée, compte-tenu de la taille importante du territoire. La représentativité du réseau actuel et étendu sera analysée, notamment au regard de la diversité géologique, pédologique et des habitats forestiers du territoire.

Dans les territoires insulaires, la diversité des sols et des modes d'occupation est grande, et varie sur de faibles distances. Il est donc légitime d'envisager l'intensification de l'échantillonnage lors des campagnes suivantes afin d'améliorer la représentativité pédologique et paysagère du réseau.

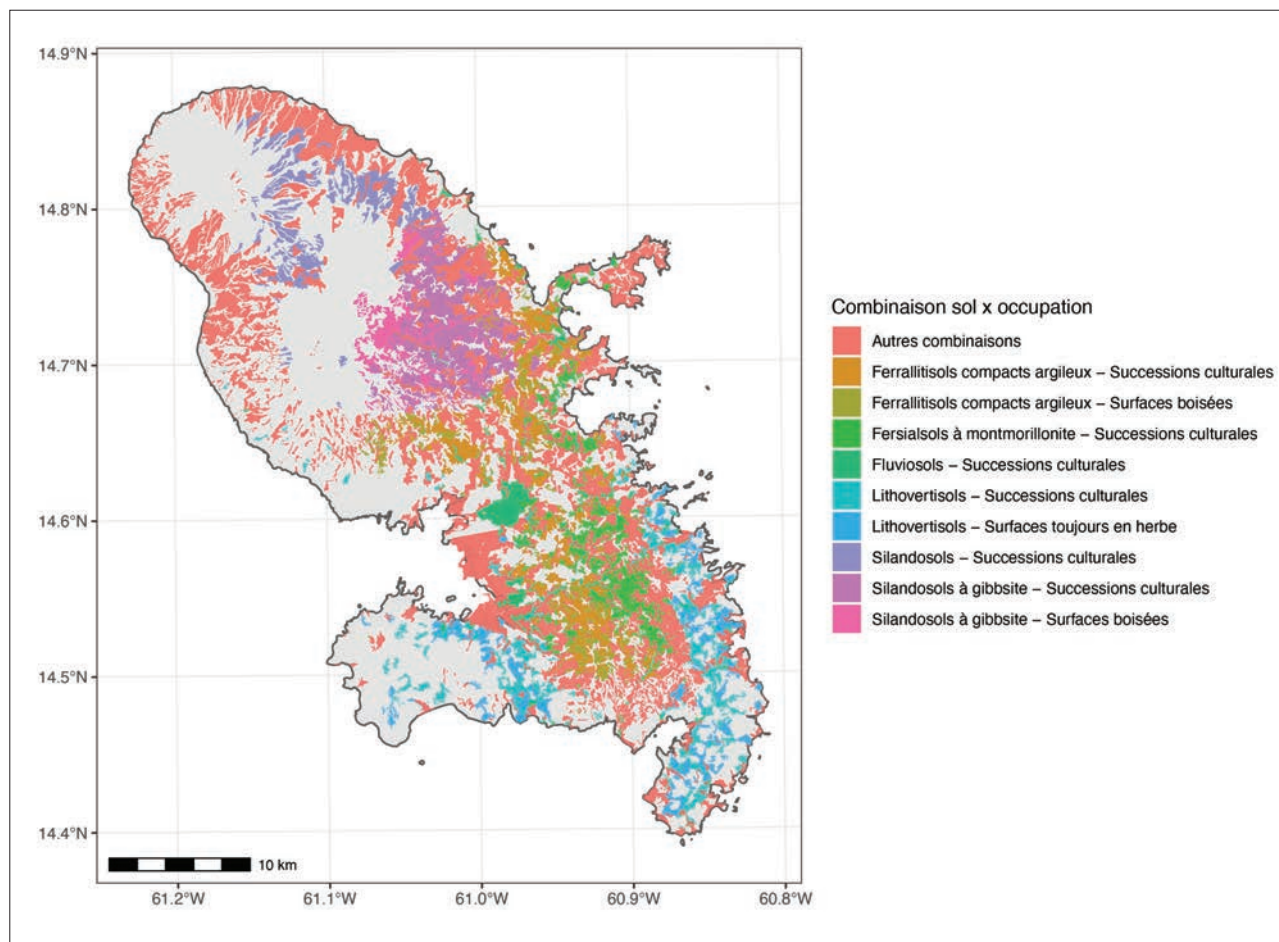
Le menu analytique devra également prendre en compte certaines spécificités locales, en particulier concernant les contaminants, avec par exemple l'analyse du mercure et de

l'arsenic, qui entrent dans les déterminations effectuées sur les sols de Guyane, ainsi que du chlordécone aux Antilles.

Outre l'intensification de l'échantillonnage dans les territoires insulaires nécessaire pour renforcer la représentativité du réseau, un élargissement du RMQS aux autres territoires d'Outre-mer qui ne bénéficient actuellement d'aucune surveillance des sols sera envisagé. En effet, 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 les territoires ultra-marins (biodiversité, contaminants, ressources alimentaires et en eau face au changement climatique, artificialisation, etc.), le RMQS devrait être étendu au reste des territoires ultra-marins en association avec les collectivités concernées qui en ont la compétence environnementale (Nouvelle Calédonie, Polynésie, Terres australes et antarctiques françaises, notamment).

Figure 14 : Combinaisons sol - occupation non associées aux sites RMQS à la Martinique.

Figure 14: *Combinations soil - land use unassociated with the RMQS sites in Martinique.*



3.4.2. Représentativité des sites dans les territoires insulaires : le cas de la Martinique

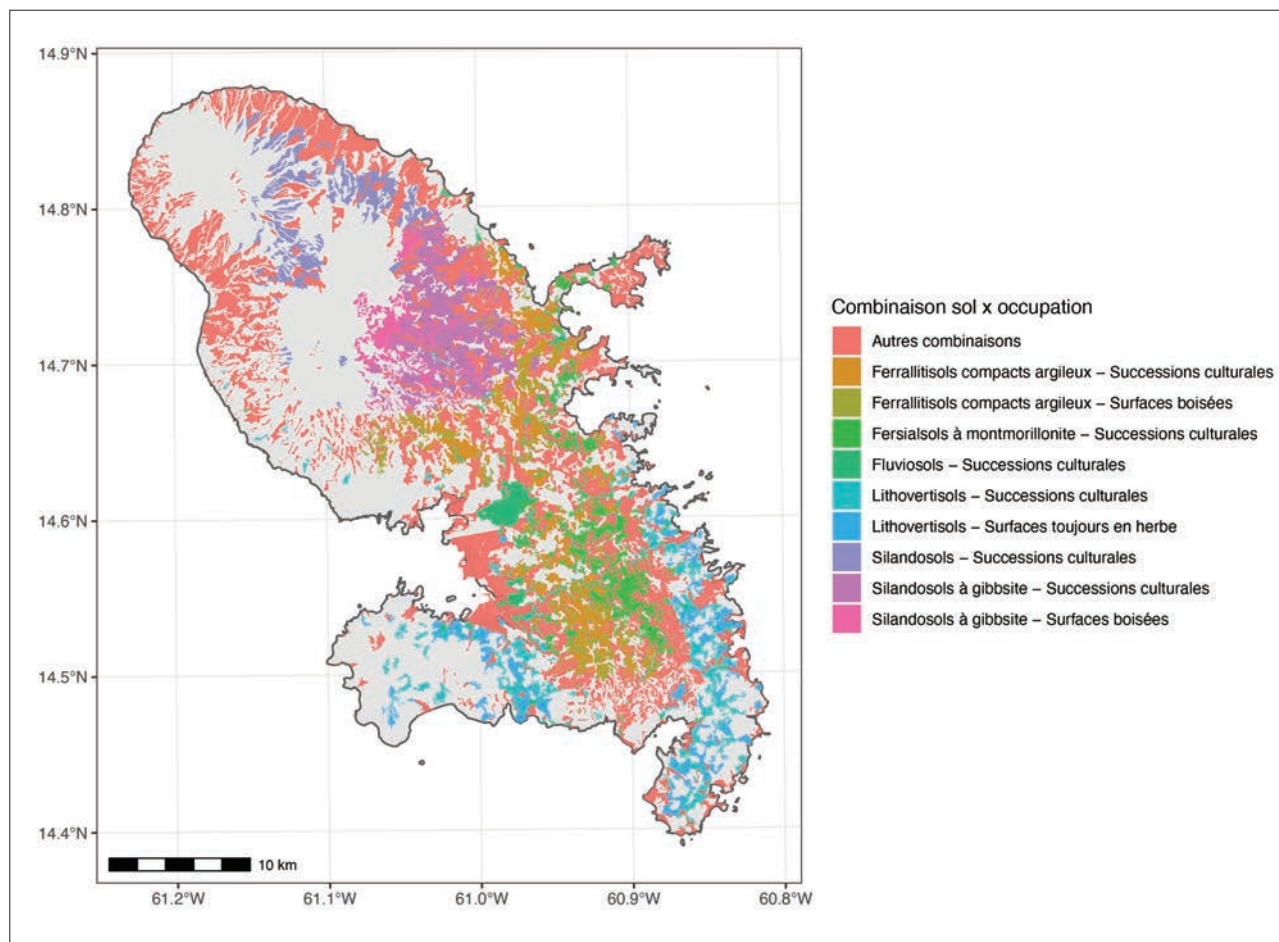
Compte tenu de la diversité des sols et des modes d'occupation sur les territoires insulaires ultramarins, il est important d'évaluer la représentativité des sites échantillonnés lors de la première campagne. Nous analysons ici la représentativité des sites dans le cas de la Martinique avec une méthode inspirée de Arrouays *et al.* (2001), qui ont étudié dans le contexte métropolitain la représentativité de réseaux de surveillance générés par des grilles de taille variable. Des cartes de types de sols et de modes d'occupation sont croisées, et la superficie des combinaisons sol - occupation dans lesquelles les points du réseau se situent est comptabilisée.

Dans le cas de la Martinique, la carte des sols utilisée a été réalisée par Colmet-Daage (1970) puis harmonisée et numérisée par l'IRD (Toulemonde *et al.*, 2006). Les noms de sols de cette carte ont été traduits vers le Référentiel Pédologique de 2008. La carte d'occupation des sols utilisée est le CORINE

Land Cover de niveau 2 datant de 2006, dont les catégories ont été traduites pour correspondre aux catégories de modes d'occupation classiquement utilisées pour le RMQS à l'échelle nationale (Successions culturales - Surfaces toujours en herbe - Milieux naturels - Surfaces boisées - Vignes et vergers).

Selon cette analyse spatiale, les huit sites RMQS en Martinique sont associés à six combinaisons sol - occupation, qui couvrent au total 17677 ha, soit 24 % de la superficie analysée ici, qui exclut les zones sans sols et les occupations urbaines et industrielles (Figure 13). Les milieux représentés par le réseau sont notamment situés dans le centre-nord et le sud de l'île, où l'on rencontre respectivement des forêts développées sur des Silandosols et des forêts ou savanes développées sur des Lithovertisols.

À l'inverse, les combinaisons de sols et de modes d'occupation non représentées par le réseau couvrent une superficie totale de 55467 ha à la Martinique, soit 76 % de la superficie analysée. Cela concerne en particulier le centre de l'île et le littoral nord de l'île (Figure 14). Les

Figure 14 : Combinaisons sol - occupation non associées aux sites RMQS à la Martinique.**Figure 14:** *Combinations soil - land use unassociated with the RMQS sites in Martinique.*

successions culturales, correspondant en Martinique aux cultures permanentes (canne, banane, vergers), annuelles, et aux zones agricoles hétérogènes, constituent une part importante des agroécosystèmes non représentés par le RMQS, et ce pour différents types de sols. Une analyse plus fine pourrait prendre en compte la variabilité du climat afin d'étudier la représentativité des sites RMQS au sein d'unités agropédoclimatiques ; ce choix n'a pas été fait ici, d'une part car la typologie des sols des territoires insulaires ultramarins intègre en partie l'effet du climat sur la pédogenèse (voir section 2.2.). D'autre part, cette analyse de la représentativité des sites de la première campagne sera utilisée pour tester différentes stratégies d'échantillonnage avec un nombre de sites plus élevés pour la deuxième campagne du RMQS. Dans cette perspective, concevoir une stratégie d'échantillonnage stratifiée selon de très nombreuses unités n'est pas optimal si l'on souhaite évaluer la performance statistique de cette stratégie.

4. CONCLUSIONS

L'apport des travaux « Outre-mer » dans le cadre du GIS Sol est indéniable. Il a souvent reposé sur la mobilisation de collègues convaincus de l'intérêt de ces actions. Dans le cadre du programme IGCS, nous sommes conscients que tout n'est pas terminé. S'agissant des politiques publiques, le travail à effectuer dans un futur proche pour l'intégration de synthèses dans le GEOPORTAIL est important car il permettra de rendre visibles « les sols ultramarins », en tout cas pour une partie des territoires.

Les données acquises dans le cadre de la première campagne du RMQS en Outre-mer sont encore en cours de traitement et seront valorisées prochainement. La deuxième campagne ultramarine en cours de préparation devra s'inscrire dans le calendrier global de la deuxième campagne du RMQS (2016-2030).

Les données de ce programme contribueront à renforcer le niveau de connaissance sur les sols ultra-marins, et sur leurs

évolutions à l'échelle pluri-décennale sous l'effet du changement climatique et des pressions anthropiques. Les stocks de carbone des sols mesurés sur les sites ultramarins pourraient permettre de valider les résultats de travaux de spatialisation existants ou futurs dans ces territoires. Les données du RMQS pourraient également combler les manques de connaissances actuels sur les stocks de carbone du sol et leurs dynamiques dans les écosystèmes forestiers et peu anthropisés de la Guadeloupe et de La Réunion, territoires où les stocks de carbone des sols ont surtout été étudiés dans des systèmes cultivés (Allo, 2019 ; Chopin et Sierra, 2021 ; Sierra *et al.*, 2015 ; Todoroff *et al.*, 2019)

Les contaminants analysés ne montrent pas de contamination anthropique des sols par les éléments traces métalliques, et un seul site dans les îles semble contaminé en HAP. L'urbanisation croissante dans ces territoires nécessite néanmoins une importante vigilance concernant les contaminants. L'étude de la biodiversité du sol des sites RMQS ultra-marins sera également renforcée, seul l'ADN du sol ayant été mesuré par INRAE de Dijon durant la première campagne, alors que ces territoires renferment une biodiversité très importante.

Contrairement aux échantillons de métropole qui bénéficient de conditions de conservation optimales dans les locaux du Conservatoire Européen des Échantillons de Sols (CEES, www.gissol.fr) à Orléans, les échantillons ultra-marins sont dispersés et stockés dans des conditions de conservation différentes, sans locaux ni ressources matérielles et humaines spécifiquement dédiées à leur conservation. L'accessibilité à ces échantillons est donc particulièrement difficile et il n'existe pas de possibilité d'accueillir de nouveaux échantillons, notamment pour la nouvelle campagne du RMQS à venir. Une infrastructure de stockage des échantillons de sols ultra marins devra donc être développée rapidement.

S'agissant des départements et régions, Guadeloupe et Réunion, et des collectivités territoriales, Guyane et Martinique, nous devons convenir que les travaux se sont déroulés sans qu'une appropriation réelle des acquis soit atteinte, mis à part aux Antilles. Mais l'expérience montre aussi que les instruments financiers de ces collectivités se trouvent face à des impératifs de demandes structurelles multiples, ce qui a limité leur manifestation d'intérêt et notre capacité de mobilisation locale.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Haut Comité de Groupement du GIS qui, convaincu de l'importance de l'Outre-mer, a su ménager les espaces financiers pour la réalisation de ces travaux.

Les auteurs remercient les personnes ayant contribué à l'implantation et l'échantillonnage des sites RMQS en Outre-mer : Guadeloupe 2006 : équipes INRAE d'Orléans et Guadeloupe avec J. André, D. Arrouays, L. Boulonne, F. Burner, Y.-M. Cabidoche, J. Doux, C. Jolivet, S. Lehmann, A. Mulciba, C. Palmier, F. Razan, A.C. Richer-de-Forges. Martinique 2007 : équipes INRAE d'Orléans, Guadeloupe et Dijon, avec F. Burner, Y.-M. Cabidoche, S. Dequiedt, C. Jolivet, A. Mulciba, L. Ranjard, C. Ratié, F. Razan, E. Tientcheu, équipe de l'IRD avec L. Rangon, F. Reynaud, T. Woignier.

Réunion 2012 : équipes INRAE d'Orléans P. Berché, C. Jolivet, N. Soler-Dominguez, C. Ratié ; de l'IRD, T. Becquer, M. Brossard, E. Dupuits-Bonin, M. Villeneuve ; du Cirad, M. Bravin, F. Feder, J.-P. Nirlo.

Mayotte 2012 : INRAE Orléans, P. Berché, C. Jolivet ; IRD M. Brossard, E. Dupuits-Bonin ; DAF-Mayotte, T. Soumaila.

Guyane 2014-2015 : INRAE Orléans, P. Berché, L. Boulonne, C. Jolivet, B. Maître, N. Soler-Dominguez, E. Tientcheu ; IRD, D. Blavet, M. Brossard, T. Desjardins, J.-C. Doudou, M. Sarrazin (laboratoire) et les intérimaires J.-P. Fleurissant, J. dos Santos Quaresma, M. Marques, S. Braga-Cardoso, R. Fernández-Abad.

Ainsi que les Représentations du Cirad à La Réunion, d'INRAE en Guadeloupe et de l'IRD à la Martinique et en Guyane pour leur appui logistique.

Nous remercions vivement les deux relecteurs de cet article pour leurs lectures attentives et leurs propositions constructives.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES (2008). Référentiel pédologique. Association française pour l'étude du sol (Afe). Éditions Quæ, Versailles, 405 p.
- Agreste (2021) AgresteGraph'Agri 2021. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation Secrétariat général. Service de la statistique et de la prospective. 223 p. ISBN 978-2-11-162013-1.
- Allo M. (2019). Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de La Réunion. Th. Doctorat - Sciences agronomiques, Université de Montpellier, 252 p.
- 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, pp. 7-17.
- 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-Oudoux C. (2022). Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années. *Étude et Gestion des Sols*, 29, pp. 365-379.
- Beaudou A.G. (1989). Recherche d'un système d'information pour le milieu physique. Une méthode de saisie et de traitement des données

- pédologiques appliquée aux régions tropicales. Paris : ORSTOM, 566 + 244 p. (Travaux et Documents Microédités ; 63). Th. Doct. État Géogr., Paris 1. 1988. ISBN 2-7099-0981-2. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:27316>
- Beaudou A., Le Martret H. (2004). MIRURAM/VALSOL : un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. *Étude et Gestion des Sols*, 11(3), pp. 271-284.
- Blancaneaux P. (1981). Essai sur le milieu naturel de la Guyane française. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 137, ORSTOM, Paris (France). 126 p. 2-7099-0618-X. fdi:01877
- Brossard M., Barthès B.G., Perrin A.-S., Courte A., Fujisaki K., Kouakoua E., Cambou A., Moulin P., Beaucher E., Sarrazin M. (2018). Stocks de Carbone des sols de Guyane : mesure et distribution, 2016-2018 : CarSguy. Rapport final, cartes et annexes. Angers : ADEME. 63 p. +17 p.
- Brouwers M. (1982a). Le milieu physique et les sols de la zone de moyenne altitude de Saint-Paul, aptitudes à la canne à sucre. IRAT-DDA. + carte 1/25000.
- Brouwers M. (1982b). Inventaire morpho-pédologique dans les « hauts » de La Réunion, aptitudes agricoles des terres. Deuxième phase. IRAT-DDA + carte 1/25000.
- Brouwers M., Raunet M. (1981). Inventaire morpho-pédologique dans les « hauts » de La Réunion, aptitudes agricoles des terres. IRAT-DDA + carte 1/25000.
- Cabidoche Y.-M., Brossard M. (2009). Le RMQS Outre-mer. La Lettre du GIS Sol n° 19, novembre 2009.
- Cabidoche Y.-M., Lesueur-Jannoyer M. (2011). Pollution durable des sols par la chlordécone aux Antilles : comment la gérer ? *Innovations Agronomiques* 16, 117.
- Carmouze J.-P., (ed.), Lucotte M., (ed.), Boudou A., (ed.). (2001). Le mercure en Amazonie : rôle de l'homme et de l'environnement, risques sanitaires. Paris : IRD, 494 p. (Expertise Collégiale). ISBN 2-7099-1467-0
- Chopin P., Sierra J. (2021). Potential and constraints for applying the "4 per 1000 Initiative" in the Caribbean: the case of Guadeloupe. *Reg. Environ. Change*, 21, 13. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01740-4>
- Colmet-Daage F., Lagache P. (1965). Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cahiers ORSTOM*, III(2) pp. 91-121.
- Colmet Daage F. (1968). Carte des sols de Grande Terre à 1/10 000, Guadeloupe. + Légende. ORSTOM (Non publiée).
- Colmet-Daage F. (1970) Carte des sols des Antilles à 1/20 000^e - Guadeloupe - Martinique (légende) / établie par F. Colmet Daage ; interprétation des fotogr. aériennes et mise au net des maquettes par J. Bernard ; analyses des sols au laboratoire par J. et M. Gautheyrou ; avec le concours de F. Lagache, J. de Crécy, A. Poumaroux, A. Pallud. - Pointe à Pitre (GLP) : ORSTOM, Office de la recherche scientifique et technique Outre-mer, Centre des Antilles. Bureau des sols ; Pointe à Pitre (GLP) : Secrétariat général des départements d'Outre-mer, Préfecture de la Guadeloupe, 1969 - 1970 - 1:20000. 18 et 24 cartes en coul. h.t. ; 26 x 70 cm.
- C.P.C.S. (1967). Classification française des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Grignon, doc. photocopié, 96 p.
- Doelsch E., van de Kerchove V., Saint Macary H. (2006). Heavy metal content in soils of Réunion (Indian Ocean). *Geoderma* 134, pp. 119-134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.09.003>
- Dupuits-Bonin E., Jameux M., Brossard M. (2015) Rapport Final de Convention MAAF - DGPAAT. Programme régional Inventaire Gestion et Conservation des Sols. Référentiel Régional Pédologique : ROM - Guadeloupe, Guyane, Île de la Réunion. Synthèses morpho-pédologiques. Doc. Eco&Sols, IRD Montpellier, 171 p.
- Froger C., Saby N.P.A., Jolivet 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, pp. 161-178. <https://doi.org/10.5194/soil-7-161-2021>
- GIS Sol (2011). L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p. <https://www.gissol.fr/publications/rapport-sur-letat-des-sols-de-france-2-849>
- Grimaldi M., Guéron S., Grimaldi C. (2015). Impact of gold mining on mercury contamination and soil degradation in Amazonian ecosystems of French Guiana. In Brearley F.Q. (ed.), Thomas A.D. (ed.). *Land-use change impacts on soil processes: tropical and savannah ecosystems*, Wallingford : CABI, 2015, p. 95-107. ISBN 978-1-78064-210-9
- 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. *Étude et Gestion des Sols*, 11(3), pp. 255-270.
- Imbert D., Portecop J. (2008). Hurricane disturbance and forest resilience: Assessing structural vs. functional changes in a Caribbean dry forest. *Forest Ecology and Management*, 255, 3494-3501, doi:10.1016/j.foreco.2008.02.030
- INSEE (2022). <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6011070?sommaire=6011075> ; <https://www.insee.fr/fr/information/2409261>.
- Jacob T. (2017). Une Guyane plurielle, entre abandon et dépendance. *L'ENAHLM*, 470, pp. 20-21.
- Jolivet C., Boulonne L., Ratié C. (2006). Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, Éd. 2006. Unité InfoSol, INRA Orléans, France.
- Le Martret H., Beaudou A., Blanca Y., Brossard M., Le Rouget Zurita B. (2008). Interface web cartographique de visualisation des données pédologiques. *Le Monde des Cartes : Revue du CFC*, 197, 31-36. fdi:010044925
- Leprun J.-C., Missot M., Viala A.-L. (collab.), Le Martret H., Wegnez F., Cheaib N., Beaudou A., Le Rouget B. (2001). Cartographie agro-pédologique des sols guyanais à partir des documents existants et intégration dans un SIG : rapport général de fin de convention. Montpellier (FRA) : IRD ; Cayenne (GUY) : EPAG, 150 p.
- Lévêque A. (1963). Les sols développés sur le bouclier antécambrien guyanais. Paris (FR) : ORSTOM, 1963, 244 p. multigr. fdi:10814
- Maliszewska-Kordybach B. (1996). Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination. *Applied Geochemistry, Environmental Geochemistry* 11, pp. 121-127. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00076-3)
- Mamy L. (coord.), Pesce S. (coord.), Sanchez W. (coord.), Amichot M., Artigas J., Aviron S., Barthélémy C., Beaudouin R., Bedos C., Bérard A., Berny P., Bertrand C., Bertrand C., Betoulle S., Bureau-Point E., Charles S., Chaumot A., Chauvel B., Coeurdassier M., Corio-Costet M.-F., Coutellec M.-A., Crouzet O., Doussan I., Faburé J., Fritsch C., Gallai N., Gonzalez P., Gouy V., Hedde M., Langlais A., Le Bellec F., Leboulanger C., Margoum C., Martin-Laurent M., Mongruel R., Morin S., Mougin C., Munaron D., Nélieu S., Pelosi C., Rault M., Sabater S., Stachowski-Haberkorn S., Sucré E., Thomas M., Tournebize J., Achard A.-L., Le Gall M., Le Perche S., Delebarre E., Larras F., Leenhardt S. (coord.) (2022). Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Rapport d'ESCO, INRAE - Ifremer (France).
- Maudouit M., Rochoy M. (2019). Revue systématique de l'impact du chlordécone sur la santé humaine aux Antilles françaises. *Thérapies* 74, pp. 611-625. <https://doi.org/10.1016/j.therap.2019.01.010>
- Messant A., Lehmann S., Moulin J., Lagacherie P., Jalabert S., Noraz A., Lemerrier 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), pp. 57-70.
- ODEADOM (2022). Recensement agricole 2020 dans les DROM : premiers enseignements.
- Quantin P., Balesdent J., Bouleau A., Delaune M., Feller C. (1991). Premiers stades d'altération de ponces volcaniques en climat tropical humide (Montagne Pelée, Martinique). *Geoderma*, 50(1-2), pp. 125-148.
- Quesada C.A., Paz C., Oblitas Mendoza E., Phillips O.L., Saiz G., Lloyd J. (2020). Variations in soil chemical and physical properties explain basin-

- wide Amazon forest soil carbon concentrations. *SOIL* 6, pp. 53-88. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>
- Raunet M. (1988). Carte morpho-pédologique de La Réunion, 1/50000, 4 feuilles. Cirad-IRAT et Région Réunion.
- Riquier J., Zebrowski C. (1975). Atlas de La Réunion : pédologie. In, Atlas des départements français d'outre-mer - 1 : La Réunion. CEGET-IGN, Diffusé par le C.N.R.S. Paris 1975.
- Rochette R., Bonnal V., Andrieux P., Cattani P. (2020). Analysis of surface water reveals land pesticide contamination: an application for the determination of chlordecone-polluted areas in Guadeloupe, French West Indies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, pp. 41132-41142. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10718-y>
- Rosello V. (1984). Les sols bruns des Hauts, île de La Réunion. Caractérisation minéralogique et microstructurale de matériaux andosoliques. Reconnaissance expérimentale de leur comportement. Thèse de spécialité, Université de Paris VII.
- Sierra J., Causeret F., Diman J.L., Publicol M., Desfontaines L., Cavalier A., Chopin P. (2015). Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 213, pp. 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.015>
- Todoroff P., Albrecht A., Allo M., Thuries L., Tillard E. (2019). C@RUN : séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation et potentiels d'atténuation du changement climatique. Cirad-IRD, 82 p.
- Toulemonde E., Le Martret H., Brossard M. (2006). Numérisation et actualisation de données pédologiques anciennes : cas de la carte de la Martinique au 1/20.000ème de F. Colmet-Daage (1969), Rapport de convention IRD-MOM 3083, sous égide de la convention GIS Sol. Documents de l'Unité VALPEDO, IRD Montpellier, 10 décembre 2006. 23 p. & CD-ROM avec SIG.
- Trouvilliez J., Mortier F. (2011). Les forêts en Outre-mer : un enjeu mondial pour la biodiversité. *Revue forestière française*, 63, pp. 540-558. <https://doi.org/10.4267/2042/46103>
- Turenne J.-F., Le Rouget G. (ill.) (1973). Carte pédologique de Guyane : Mana Saint-Laurent S-O, Mana Saint-Laurent S-E à 1/50.000. Notice explicative, n° 49, ORSTOM, Paris. 110 p., cartes 1/50.000.
- Zebrowski C. (1975). Étude d'une climatoséquence dans l'île de La Réunion. *Cahier ORSTOM, série pédologie*, XIII (3/4), pp. 255-278.

Le système d'information sur les sols de France

Capitaliser, analyser, diffuser, aller vers l'open data

C. Le Bas^(1*), M. Brossard⁽²⁾, J.-F. Brunet⁽³⁾, L. Commagnac⁽⁴⁾, A. Beaudou⁽⁵⁾, S. Belbèze⁽³⁾, M. Bellifa⁽⁴⁾, H. Boukir⁽¹⁾, M. Dalmasso⁽⁴⁾, N. Derrière⁽⁴⁾, C. Lattelais⁽⁶⁾, H. Le Martret⁽⁷⁾, S. Lehmann⁽¹⁾, A. Pickel⁽¹⁾, A. C. Richer-de-Forges⁽¹⁾, N. Saby⁽¹⁾, A. Schellenberger⁽¹⁾, E. Taffoureau⁽³⁾, B. Toutain⁽⁸⁾, S. Wurpillot⁽⁴⁾ et R. Yahiaoui⁽¹⁾

- 1) INRAE, Unité Info&Sols, 45075 Orléans cedex 2, France
- 2) IRD, UMR 210 Eco&Sols, Campus SupAgro, 2 Place Viala, 34060 Montpellier cedex 2, France
- 3) BRGM, 3, Avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans cedex 2, France
- 4) IGN, 73 avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé cedex
- 5) Retraité, ancien pédologue IRD, France
- 6) INRAE, LESSEM, 38402 Saint Martin d'Hères cedex, France
- 7) Retraité, ancien informaticien et pédologue IRD, France
- 8) INRAE, Dynafor, 31326 Castanet Tolosan cedex, France

* Auteur correspondant : christine.le-bas@inrae.fr

RÉSUMÉ

Le Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (GIS Sol) a été créé en 2001 avec la mission de concevoir et de coordonner l'inventaire et la surveillance des sols en France. Cette mission nécessite de capitaliser les données existantes ou nouvellement produites dans des bases de données, de les analyser, de produire de nouvelles connaissances et de restituer données et connaissances aux utilisateurs. Cet article décrit succinctement les bases de données et les outils associés aux grands programmes d'acquisition de données du GIS Sol, puis les travaux d'analyse de ces données pour produire des métriques et des prédictions sur les propriétés du sol dans l'espace et le temps, et enfin les outils et développements pour la consultation et la diffusion des données sur les sols. Ce panorama des outils actuellement disponibles ou en cours de développement montre l'importance des efforts réalisés sur ce plan par le GIS Sol depuis 2001.

Mots-clés

Base de données, système d'information, cartographie numérique des sols, statistiques, diffusion de données, web sémantique.

Comment citer cet article :

Le Bas C., Brossard M., Brunet J.-F., Commagnac L., Beaudou A., Belbèze S., Bellifa M., Boukir H., Dalmasso M., Derrière N., Lattelais C., Le Martret H., Lehmann S., Pickel A., Richer-de-Forges A. C., Saby N., Schellenberger A., Taffoureau E., Toutain B., Wurpillot S. et Yahiaoui R., 2024 -

Le système d'information sur les sols de France : capitaliser, analyser, diffuser, aller vers l'open data - Étude et Gestion des Sols, 31, 59-73

SUMMARY**THE FRENCH SOIL INFORMATION SYSTEM: Capitalize, analyze, disseminate, move towards open data**

The Scientific Interest Group on soil (GIS Sol) was created in 2001 with the mission of designing and coordinating the inventory and monitoring of soils in France. This mission requires capitalizing existing or newly produced data in databases, analyzing them, producing new knowledge and bringing data and knowledge to the attention of users. This article briefly describes the databases and their associated tools for the main data acquisition programmes of the GIS Sol. Then the work of analyzing these data to produce statistics and predictions on soil properties is presented. Finally, the tools and developments for consultation and dissemination of soil data are described. This panorama of tools currently available or under development shows the importance of the efforts made by GIS Sol since 2001.

Key-words

Database, information system, digital soil mapping, statistics, data dissemination, semantic web.

RESUMEN**EL SISTEMA DE INFORMACIÓN DEL SUELO FRANCÉS: Capitalizar, analizar, difundir, avanzar hacia los datos abiertos**

El Grupo de Interés Científico del Suelo (GIS Sol) fue creado en 2001 con la misión de diseñar y coordinar el inventario y seguimiento de suelos en Francia. Esta misión requiere capitalizar datos existentes o recién producidos en bases de datos, analizarlos para producir nuevos conocimientos y devolver datos y conocimientos a los usuarios. Este artículo describe brevemente las bases de datos y sus herramientas asociadas para los principales programas de adquisición de datos del GIS Sol, luego el trabajo de análisis de estos datos para producir estadísticas y predicciones sobre las propiedades del suelo y finalmente las herramientas y desarrollos para la consulta y difusión de datos del suelo. Este panorama de herramientas actualmente disponibles o en desarrollo muestra la importancia del esfuerzo realizado por GIS Sol desde 2001.

Palabras clave

Base de datos, sistema de información, cartografía digital de suelos, estadísticas, difusión de datos, web semántica.

1. INTRODUCTION

Les sols sont au cœur de grands enjeux de l'humanité, qu'ils soient alimentaires, sanitaires ou environnementaux (Lehmann *et al.*, 2020). Cette place prépondérante implique une bonne connaissance de leurs propriétés et de leurs évolutions, afin de pouvoir mettre en place des politiques publiques assurant leur préservation et la pérennité de leurs fonctions. Le Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, le GIS Sol, a été créé, en 2001, dans le but de concevoir et de coordonner des programmes nationaux d'inventaire et de surveillance des sols (Arrouays *et al.*, 2022). A cette époque, il était également nécessaire de développer un système d'information sur les sols de France permettant de capitaliser les données acquises, de les analyser, de produire de nouvelles connaissances et de restituer les données et les connaissances aux utilisateurs. Pour cela, le GIS Sol s'est appuyé sur des bases de données préexistantes comme DoneSol pour la France métropolitaine (Gaultier *et al.*, 1993) ou Valsol pour l'Outre-mer (Beaudou et Le Martret, 2004). L'arrivée dans le GIS Sol de nouveaux membres comme l'IGN en 2019 et le BRGM en 2021 a fait entrer dans le champ du GIS Sol de nouveaux programmes sur les sols forestiers et les sols urbains. Il résulte de cet historique un ensemble de systèmes d'information développés pour les différents programmes du GIS Sol et dont cet article montre la richesse.

Parallèlement, depuis plus de 20 ans, le contexte relatif à la gestion des informations a également fortement évolué vers une ouverture de plus en plus grande des données (Rennes *et al.*, 2023). De nombreux travaux ont été réalisés sur la manière de le faire. Comment les rendre faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables selon les principes des données FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) (Wilkinson *et al.*, 2016)? De nouveaux standards sont apparus comme ceux de l'Open Geospatial Consortium (OGC) pour les données spatiales (CSW en 1999, WMS en 2000, WFS en 2002). Ils ont été repris par la Directive européenne Inspire en 2007 qui vise à créer une infrastructure européenne des données géographiques sur l'environnement. Des standards ont également été définis par le World Wide Web Consortium (W3C) pour les données diffusées sur internet (par exemple format RDF en 2014). De nouvelles technologies et infrastructures se sont développées pour permettre l'interopérabilité des données. Le GIS Sol a investi dans ces nouvelles technologies et ces standards pour mieux diffuser ses données et en permettre l'interopérabilité.

L'objectif de cet article est de faire la synthèse des travaux réalisés dans ce domaine par le GIS Sol, en montrant le chemin parcouru depuis 2001. Nous présentons d'abord les différentes bases de données permettant de capitaliser les données, puis nous décrivons succinctement les outils développés pour les analyser, enfin, nous abordons les outils disponibles pour assurer leur visualisation et leur diffusion.

2. CAPITALISER LES DONNÉES SUR LES SOLS DE FRANCE

2.1. La base de données DoneSol : capitaliser les données des programmes IGCS et RMQS

Le coût d'acquisition des données sur les sols (y compris le temps passé) rend leur numérisation primordiale. C'est pourquoi, dans le cadre du programme Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS), la base de données DoneSol (Figure 1) a été constituée dès 1992 pour stocker, en un endroit unique et de façon harmonisée, l'ensemble des études pédologiques réalisées dans le cadre de ce programme (Gaultier *et al.*, 1993). Son développement s'est appuyé, d'une part, sur des travaux antérieurs visant à décrire les unités cartographiques de sol, et d'autre part, sur le système standardisé de description des profils de sols et des résultats d'analyses de laboratoire STIPA (Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique, Bertrand *et al.*, 1979). Cette base de données a évolué régulièrement avec une version 2 en 2001, l'intégration des données du programme Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) en 2002 (Grolleau *et al.*, 2004), et une version 3 en 2013 (Toutain, 2013). Ces différentes versions ont permis de faire évoluer le modèle de données afin d'intégrer de nouveaux types de données (données du RMQS, données sur les documents de la cartothèque, extension aux données de l'Outre-mer), d'améliorer leur description, d'améliorer l'efficacité de la base de données et son évolutivité, en intégrant l'évolution des technologies.

Le modèle de données actuel de DoneSol (https://dw4.gissol.fr/fichiers/modele_physique_donnees_donesol310_2023.pdf) permet de stocker plusieurs ensembles de données dans une base de données relationnelle, gérée sous PostgreSQL® :

- les données sur les études pédologiques et les documents associés qui sont présents dans la cartothèque ;
- les données surfaciques décrivant les Unités cartographiques de sol (UCS), les Unités typologiques de sol (UTS) et leurs strates ;
- les données ponctuelles décrivant les profils et les horizons ;
- les données sur les sites RMQS incluant le suivi des interventions réalisées sur les sites ;
- les données sur les échantillons qui sont traités dans le Conservatoire européen d'échantillons de sol, notamment le traçage de leurs traitements ;
- les données sur les résultats d'analyse chimique ou physique.

Le schéma conceptuel de DoneSol inclut non seulement la description des objets (*i.e.* UTS) et de leurs propriétés (*i.e.* nom de l'UTS), mais aussi les relations entre ces objets (*i.e.* les horizons liés à un profil) et les contraintes d'intégrité (*i.e.* le pH est compris entre 0 et 14).

Des outils de saisie et de consultation ont été développés

par INRAE et certains partenaires régionaux du programme IGCS dès les années 2000 (Grolleau *et al.*, 2004). Ils ont permis d'introduire des vérifications dès la saisie des données, améliorant ainsi leur qualité. En 2006, une interface web de saisie et de consultation a été développée, DoneSolWeb, permettant un accès facilité à la base de données, une connexion sécurisée et de meilleures fonctionnalités. Cette interface est en constante amélioration afin de mieux répondre aux demandes des utilisateurs et de s'adapter aux progrès technologiques.

Dans le cadre de la 2^e campagne du RMQS (2016-2027), le développement d'un utilitaire de consultation et de saisie nomade pour le terrain a été réalisé afin de simplifier le travail de terrain en permettant i) la consultation des données de la première campagne du RMQS nécessaire au retour sur site et ii) la saisie directe des observations de la 2^e campagne. Cet outil fluidifie également le transfert des données entre les équipes des partenaires régionaux qui interviennent sur le terrain et la base DoneSol, et limite la saisie manuelle de données, source d'erreurs. Cette application, DoneSolNomade, fonctionne avec tout type d'appareil (ordinateur, tablette ou smartphone) et prend en charge les contraintes du terrain en matière de connexion Internet. Une version de test a été déployée en 2023, sa mise en production sera effective en 2024.

Un premier niveau de vérification de la cohérence des données intervient au moment de la saisie, grâce à des tests au niveau de l'interface DoneSolWeb. Une vérification de la cohérence des données est aussi nécessaire *a posteriori*. Cette vérification s'effectue depuis 2013 (Chapuis *et al.*, 2013) grâce à l'outil Sivercoh (SI de Vérification de Cohérence). Développé dans un souci de généralité, Sivercoh est un système d'information permettant de vérifier la cohérence de données stockées dans des bases de données relationnelles. Cet outil permet de réaliser des contrôles complexes des jeux de données, comme par exemple i) d'importer des requêtes de vérification de cohérence, ii) de les organiser en « jeux » de requêtes, et iii) de les exécuter sur une base de données relationnelle. Un rapport dresse la liste des incohérences à vérifier pour améliorer la qualité des données. L'utilisateur peut alors soit corriger l'anomalie, soit la justifier si celle-ci correspond à une situation particulière.

Des formations à la saisie des données et à l'interrogation de DoneSol sont dispensées gratuitement depuis 2005 (Richer-de-Forges *et al.*, 2018). Cette offre de formation évolue régulièrement afin de répondre aux besoins des utilisateurs. Ainsi, depuis 2016, une formation dédiée à l'interrogation des données parcourt toutes les étapes depuis l'interrogation de DoneSol jusqu'à la réalisation d'une carte thématique (*i.e.* carte du Réservoir Utilisable). La formation régulière des opérateurs de saisie depuis 2005 a amélioré la qualité des données de façon appréciable. Cette offre de formation est complétée par un ensemble de vidéos en ligne dédiées chacune à un aspect spécifique de DoneSol (*e.g.* personnalisation des interfaces, format d'export de DoneSolWeb, etc.).

2.2. La base de données Valsol : capitaliser les données sur les Outre-mer

Alors que la base de données DoneSol a vocation à capitaliser les données du territoire national métropolitain, la base de données Valsol a pour objectif de sauvegarder et de valoriser les données acquises par l'Orstom puis l'IRD en zones tropicales. Même si Valsol a bénéficié de l'expérience d'INRAE avec la base de données DoneSol, plusieurs éléments ont conduit à l'élaboration d'un modèle conceptuel de données différent. Les données Orstom-IRD, nombreuses et variées, sont spécifiques des régions intertropicales ; le dictionnaire des données y est donc adapté. De plus, les travaux Orstom-IRD concernent généralement la reconnaissance et la cartographie des sols à des échelles très variées, allant du 1/20 000 (ex. Basse Terre de la Guadeloupe, Martinique) à des échelles continentales en Afrique (1/500 000, voire 1/1 000 000). L'approche morpho-pédologique des pédologues Orstom-IRD étant à la base de ces travaux de terrain, Valsol a donc suivi cette logique d'organisation de l'information. Elle a été développée à partir de 1997 (Beaudou et Le Martret, 2004) avec deux prérequis : premièrement, s'appuyer sur des logiciels libres (PostgreSQL®, etc.) afin de ne pas pénaliser les partenaires des pays tropicaux, et deuxièmement, la nature des données pédologiques existantes étant très variée, maintenir une souplesse qui permette des restitutions adaptées aux différents milieux.

Valsol est entrée en production en 2003, ouverte aux partenaires étrangers, mais n'a plus été maintenue à partir de 2014. En parallèle, des interfaces de visualisation des données géographiques (Le Martret *et al.*, 2008) ont été développées.

Les données sont regroupées selon deux grandes subdivisions :

- les données générales concernant les études, les auteurs, les cartes, les organismes, avec les tables correspondantes. Elles sont indépendantes des données thématiques et peuvent se rattacher aux métadonnées.
- les données thématiques séparées en deux ensembles : (1) les données morphologiques regroupant les caractéristiques des grands paysages, paysages et segments ; et (2) les données pédologiques (description des sols et des horizons, et leurs caractères analytiques).

Les données thématiques ont été subdivisées en deux groupes en fonction de leur nature : (1) les données réelles décrivant des objets observés sur le terrain, ponctuels ou linéaires (grands paysages ou transects, paysages ou séquences, segments, profils, horizons), spatialement localisés et représentés par des polygones ou des points sur une carte ; (2) les données cartographiques correspondant à une représentation spatiale d'un ensemble de sols, d'un sol et de ses composants (unité de grand paysage, unité de paysage, unité de segment) et qui sont représentées par un polygone ; enfin (3) les données synthétiques, résultat d'un travail de

synthèse associant plusieurs sources d'informations. Elles sont construites à partir des données réelles (moyennes) et permettent de caractériser les sols (profils, horizons, analyses synthétiques).

Les travaux d'inventaires et de prospections pédologiques, puis leur déclinaison dans divers documents, sont anciens dans les Outre-mer. Ils s'échelonnent sur plusieurs territoires dès les années 1950, tant en milieu continental que dans les domaines insulaires volcaniques (Brossard *et al.*, 2023). Valsol a permis de sauvegarder des données originales non encore publiées ainsi que des données issues de travaux d'inventaires pédologiques publiés. Ainsi les données des Antilles couvrent environ 900 profils de sols, celles de la Guyane 250, celles de la Réunion 270 ; selon les études, les contenus analytiques sont variables.

En 2021, un travail méthodologique d'échanges de données entre Valsol et DoneSol a été initié. L'adaptation d'un dictionnaire Valsol qui permette la mise en correspondance des données Valsol avec DoneSol, sous forme de table, a été effectuée. Des tests ont été réalisés avec les données de Guyane. Les scripts de transfert sont aujourd'hui prêts à être appliqués sur des bases conformes au format Valsol vers DoneSol3. Il est donc possible d'intégrer dans DoneSol3 des données Valsol selon leur disponibilité. Ce travail a permis d'identifier les difficultés liées à la mise en conformité de données pédologiques, celle-ci nécessitant un long travail d'expertise.

2.3. Les bases de données à vocation statistique sur les sols agricoles : BDAT et BDETM

Depuis leur création, les programmes Base de données d'analyses de terre (BDAT) et Base de données sur les éléments traces métalliques (BDETM) ont pour objectif de capitaliser dans un système d'information national les résultats d'analyses de sols produits dans le cadre des activités agricoles (Baize *et al.*, 2006 ; Saby *et al.*, 2014). Une très grande majorité de ces analyses est réalisée par les laboratoires d'analyses de sols agréés par le ministère en charge de l'agriculture. Pour la plupart, ces analyses concernent les horizons de surface des sols cultivés et sont demandées par les agriculteurs pour piloter la fertilisation de leur parcelle (programme BDAT, données d'analyses agronomiques) ou pour conduire des plans d'épandage de boues de stations d'épuration (programme BDETM, données sur les éléments traces métalliques). Chaque analyse de sol est géoréférencée à la commune pour limiter la problématique juridique liée à la protection des données personnelles, ce qui rend leur exploitation plus complexe. Cette sécurité est nécessaire pour être conforme au règlement européen sur la protection des données (RGPD). Une procédure de traitement des fichiers d'analyse permet leur insertion dans une base de données relationnelle dédiée, sous PostgreSQL® après vérification et validation de l'analyse.

2.4. La base de données BDSolU : capitaliser les données sur les sols urbains

La France s'est dotée d'un cadre législatif (Loi ALUR - Accès au logement et à un urbanisme rénové - 2014 (MTECT, 2022) et Loi NOTRE - Nouvelle organisation territoriale de la République (Vie Publique, 2015)) et de mécanismes financiers (Plan « France-Relance » (MEFSIN, 2022)) pour limiter l'étalement urbain et favoriser la restauration des friches, y compris celles potentiellement polluées. Du point de vue technique, les recommandations ministérielles en matière de gestion des sites (potentiellement) pollués, préconisent depuis longtemps le recours aux concentrations habituelles des sols en métaux, métalloïdes et substances organiques, pour diagnostiquer une éventuelle pollution ou pour gérer les terres excavées. Intervenant en appui à cette politique, l'Ineris et le BRGM éditent régulièrement des guides de bonnes pratiques de prélèvement, d'analyse, de caractérisation et de valorisation des sols (MEEM, 2018).

Or, les sols des zones urbaines résultent de plusieurs siècles d'activités humaines incluant remaniement, déblais, remblais et dépôts d'émissions atmosphériques provenant d'usines, de chaufferies et de trafic routier. La composition chimique des sols urbains, notamment pour des molécules indésirables, est une information mal connue, difficile à appréhender et pourtant de plus en plus recherchée. Elle est l'objet d'une demande sociétale croissante en vue de garantir la santé publique tout en économisant les ressources foncières urbaines et agricoles.

Pour un territoire donné, les concentrations naturelles d'éléments ou de substances chimiques dans le sol, en dehors de tout apport lié aux activités humaines, constituent le fond pédogéochimique naturel (FPGN). Le FPGN et les concentrations diffuses dues aux activités humaines représentent le fond pédogéochimique anthropisé (FPGA). Les concentrations diffuses proviennent des retombées des émissions atmosphériques, proches ou lointaines, des substances introduites par les pratiques agricoles ainsi que des zones de remblais d'origine naturelle. Le FPGA est donc compris entre des seuils, appelés valeurs de fond, qui le distinguent du FPGN, et des concentrations relevant des anomalies d'origine humaine.

En vue de déterminer ces valeurs de fond, l'Ademe et le BRGM recueillent et harmonisent depuis 2010, sur l'ensemble du territoire national, des analyses de sols représentatifs du fond pédogéochimique anthropisé ainsi que la description de leurs conditions d'obtention (localisation, méthodes de sondage, de prélèvement, d'analyse, etc.). Il s'agit du projet « Etablissement de valeurs de fond pédogéochimique - FGU ». Ces informations sont réunies dans la Base de Données des analyses de Sols Urbains, BDSolU (www.bdsolu.fr) développée sous PostgreSQL®. Elles ne résultent pas de campagnes de prélèvements et d'analyses conduites spécifiquement pour cet objectif, mais de divers projets de recherche, d'aménagements

urbains ou de détermination de référentiels pédogéochimiques locaux (Brunet *et al.*, 2023).

Depuis 2018, ce projet, conduit en partenariat avec INRAE et le bureau d'étude eOde avec l'appui de Mines Paris-Tech, comprend, outre la numérisation des données, trois volets destinés respectivement :

- à la mise au point d'une méthode reconnue de calcul des valeurs de fond ;
- à la mise au point de l'interopérabilité des données DoneSol et BDSolU ;
- au développement, à terme, d'un outil cartographique interactif pour la diffusion des résultats.

Il n'existe pas actuellement, de par le monde, une méthode de référence de détermination des valeurs de fond. Diverses méthodes sont mises en œuvre en fonction des domaines scientifiques, des choix méthodologiques et de chaque pays, des objectifs visés, voire des auteurs (Belbèze *et al.*, 2023). La mise au point d'une méthode reconnue par les principales instances nationales fait donc partie des objectifs et se met en place progressivement en France.

L'interopérabilité des données DoneSol et BDSolU permettra une interrogation simultanée des deux bases de données afin :

- d'étendre l'effectif des populations servant à la détermination des valeurs de fond ;
- d'obtenir des résultats exploitables à l'interface entre zones agricole et urbaine.

Plusieurs challenges importants dépendent de la diffusion des référentiels de fond pédogéochimique au moyen d'un outil interactif (Brunet *et al.*, 2023) :

- interroger les bases de données et réaliser les calculs en temps réel ;
- produire des calculs experts au moyen de méthodes statistiques et géostatistiques avancées ;
- fournir des cartographies représentant par interpolation les zones géographiques couvertes par les référentiels, intégrant des informations sur les incertitudes associées ;
- réaliser des représentations cartographiques en temps réel en préservant la confidentialité des lieux de prélèvement parfois souhaitée par les propriétaires des données.

2.5. La base de données de l'Inventaire forestier national : capitaliser les données sur les sols forestiers

Depuis les années 1960, l'Inventaire forestier national (IFN) acquiert des données sur les ressources forestières. Depuis son changement de méthode en 2005, l'IFN est un inventaire statistique par échantillonnage spatial systématique (selon une grille nationale de maille kilométrique déployée à l'échelle de la France métropolitaine) à caractère obligatoire. Il a obtenu le label d'intérêt général et de qualité statistique en juin 2017 auprès du Conseil national de l'information statistique (CNIS).

Les données relevées concernent la forêt indépendamment des questions de propriété. C'est un inventaire anonyme et les coordonnées précises des placettes sont protégées par diverses législations (données personnelles, secret statistique, protection de l'environnement). Pour plus de détails sur la méthode d'inventaire, voir <https://inventaire-forestier.ign.fr>. Les données sols de l'inventaire forestier font partie des données écologiques relevées en forêt, et constituent une des plus longues séries temporelles de l'inventaire forestier. Elles sont relevées sans modification notable du protocole depuis 1992. Les données sur les sols forestiers, versées dans la base de données DoneSol en 2021, remontent à 1987. La description du sol sous forêt, dans le cadre du protocole IFN, nécessite d'étudier l'humus présent (donnée d'importance majeure pour les sols forestiers) identifié selon une clé de détermination réalisée d'après Jabiol *et al.* (1995). Une fosse pédologique de 40 cm de profondeur est ensuite creusée, puis un sondage à la tarière jusqu'à 1 mètre de profondeur est effectué, si possible. Des levés sont réalisés pour décrire au mieux le point d'inventaire. La fosse et le sondage sont réalisés dans une zone considérée comme représentative de l'ensemble de la surface de la placette (cercle de 15 m de rayon), en évitant au mieux les zones perturbées ou anthropisées.

L'étude de la fosse et du sondage permet de renseigner à dire d'expert (l'IFN ne réalise pas d'analyses chimiques ou granulométriques sur les points d'inventaire) près de 30 variables, caractérisant notamment l'humus, la charge en éléments grossiers, la texture des horizons, la profondeur d'apparition de la décarbonatation, la présence d'hydromorphie, etc. Après avoir renseigné ces éléments, le type de sol est identifié, selon une clé de détermination proche de la classification de Duchaufour (Duchaufour, 1991). Les données de l'inventaire sont stockées dans des bases de données gérées sous PostgreSQL®. Les données sol sont dans une table dédiée. Le lien avec les autres données acquises sur la placette (dendrométriques, écofloristiques, etc.), stockées dans d'autres tables, se fait grâce à un numéro d'identifiant unique de placette.

Pour l'Inventaire forestier, la capacité à analyser conjointement les données dendrométriques et pédologiques est essentielle, hier pour analyser les relations entre type de stations forestières et productivité des essences, comme aujourd'hui pour anticiper l'adaptation des forêts et des essences au changement climatique.

3. ANALYSER LES DONNÉES : STATISTIQUES ET PRÉDICTIONS

3.1. Développer un entrepôt de données : système d'information statistique et système d'information décisionnel

L'objectif principal de la base de données DoneSol est de stocker des données. Son modèle conceptuel a donc été développé pour optimiser leur stockage et assurer leur intégrité et leur unicité. Ainsi, DoneSol est une base de données relationnelle comprenant un nombre de tables important ce qui nécessite une bonne connaissance de sa structure et des compétences en requête SQL pour en extraire l'information recherchée. A cela s'ajoutent les enjeux de l'open data qui nécessitent de mettre en place des outils de consultation et de téléchargement de données, et de leur diffusion massive. Afin d'une part, de faciliter l'interrogation des données, et d'autre part, de 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 (Figure 1).

Le système d'information décisionnel (SID) met en œuvre un ensemble de techniques et d'outils pour transformer des données issues de bases de données en données à valeur ajoutée, lisibles facilement et directement utilisables. Il est employé 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 (données climatiques, topographiques, d'occupation du sol, etc.).

Les données nécessaires sont extraites des bases de données, puis transformées selon des règles prédéfinies, dites métier, incluant une connaissance fine de leur organisation (ce qui peut inclure des calculs) et enfin restituées sous forme d'informations exploitables (datamart ou magasin de données). Cela permet de capitaliser l'expertise acquise sur les données et les traitements mis au point par les ingénieurs chargés de l'analyse des données en les automatisant. Cela facilite également le suivi des différentes versions des jeux de données, en perpétuelle évolution du fait des corrections apportées aux données de base. Les datamarts ainsi produits constituent des supports de partage des données, dans le respect des droits de propriété intellectuelle, au sein de l'unité Info&Sols, auprès de partenaires, et dans le cadre de projets nécessitant la structuration, l'agrégation et le croisement de données multi-source. Ils sont également le support des applications de consultation et de téléchargement de données (services web, Geosol) pour celles qui peuvent être diffusées directement par INRAE. Cette architecture s'inscrit pleinement dans une

démarche qualité : informations contrôlées, reproductibles, traçables et décrites par des métadonnées.

Le système d'information statistique (SIS), quant à lui, a été mis en place pour organiser et automatiser les traitements statistiques réalisés sur les données avant leur diffusion. Il prend la forme d'une chaîne de traitement des données qui sont stockées dans le système d'information décisionnel. Il peut produire trois formes de résultats : des tableaux de données, des cartes de type choroplèthe et des cartes de type grille issues de processus d'interpolation spatiale. L'ensemble de ces données est diffusable à travers des services web.

3.2. Prédire les propriétés des sols, calculer des bilans et des indicateurs

En disposant, dans le système d'information, des observations conjointes de propriétés des sols et de variables représentant certains de leurs déterminants, il est possible, en utilisant des modèles statistiques adaptés, de modéliser spatialement et temporellement ces propriétés. Les jeux de données ainsi que les méthodes utilisées sont adaptés à l'objectif visé par la modélisation, à savoir comprendre et modéliser les distributions spatio-temporelles des sols et de leurs propriétés, prédire spatialement ces propriétés (cartographie des sols par modélisation statistique (CSMS)) ou produire des indicateurs. Le choix des méthodes statistiques tient également compte de la nature particulière des données sols disponibles : distributions avec données anomaliques, données censurées, distributions log-normales, etc.

Dans le cadre de la prédiction de propriétés des sols, l'intérêt de ces méthodes, outre la production de jeux de données spatialement exhaustif à résolution fine (90 m pour le programme *GlobalSoilMap* (Chen et al., 2022 ; Loiseau et al., 2020)), est de fournir les incertitudes d'estimation associées. Ces incertitudes permettent d'informer l'utilisateur sur la précision de la prédiction et d'identifier des zones prioritaires pour l'acquisition de données. On peut citer, par exemple, les prédictions du réservoir utile des sols par Román Dobarco et al. (2019) ou les prédictions des éléments traces métalliques par Saby et al. (2018).

Afin de répondre à la demande sociétale et des pouvoirs publics, la production d'indicateurs, de statistiques ou encore de bilans sont également réalisés. Ces bilans ou statistiques portent, comme la cartographie des sols par modélisation statistique, sur différentes propriétés des sols qui peuvent être aussi variées que la quantité d'ADN microbien, le réservoir utile, le stock de carbone ou les besoins en fertilisation minérale. Cependant, à la différence de la cartographie des sols par modélisation statistique, il s'agit ici moins de prédire le plus finement possible la distribution spatiale d'une variable, que d'estimer sa valeur moyenne, sa variabilité, au sein d'unités spatiales, temporelles ou encore thématiques (e.g. l'occupation du sol) homogènes et

qui ont un sens pour les pouvoirs publics. On répond donc plus à un besoin de quantification qu'à celui de localisation (de Gruijter *et al.*, 2006).

L'ensemble de ces travaux s'effectue dans un objectif de capitalisation et d'automatisation des traitements en s'appuyant sur l'entrepôt de données afin d'améliorer la diffusion des résultats.

3.3. Définir un workflow pour le calcul du fond pédogéochimique

La capitalisation de données sur les sols des zones urbaines dans la BDSolU a pour objectif de permettre la détermination des valeurs de fonds pédogéochimiques. Un workflow basé sur quatre étapes a été mis au point :

1. Une première étape i) prend en compte une zone géographique (agglomérations de communes, communes et quartiers), ii) une profondeur d'intérêt (prélèvements inférieurs ou supérieurs à 30 cm sous la surface du sol) selon que le FPGA recherché est destiné à un diagnostic de l'exposition sanitaire à des polluants du sol ou à la gestion de terres excavées (Ademe, 2018), et iii) évalue s'il existe un effectif suffisant d'analyses.
2. Une sélection des données disponibles dans la zone et à la profondeur choisie permet d'extraire les points de prélèvement et les échantillons les plus représentatifs du fond pédogéochimique recherché. En effet, l'importante hétérogénéité des données de la BDSolU liée aux origines diverses des données nécessite de vérifier leur représentativité vis-à-vis de l'objectif de l'utilisateur. Ceci est possible grâce aux divers champs qui décrivent les conditions d'obtention des données. Si la sélection n'atteint pas le nombre minimal requis d'échantillons pour la détermination de valeurs de fond, elle peut être élargie sur des critères moins stricts qui seront notifiés aux utilisateurs. Cette méthode dite des « indicatrices » a été transcrite dans un algorithme sous le langage R®.
3. Afin de compenser l'irrégularité de la répartition spatiale des points de prélèvement qui peut biaiser les résultats en donnant plus de poids à une zone géographique qu'à une autre présentant une moindre densité de prélèvements, une méthode simple de regroupement est mise en œuvre au moyen d'un algorithme tenant compte de la densité des points de prélèvements dans une grille arbitraire de 100 cellules tracée sur la zone géographique considérée (méthode dite « à fenêtre » ; Sauvaget *et al.*, 2022). Pour tenir compte des concentrations très faibles inférieures aux limites de quantification des méthodes d'analyse et ainsi éviter un biais statistique important (Helsel, 2005), une méthode de discrétisation d'une loi entre 0 et la limite de quantification est appliquée. Transcrite sous langage R®, elle vient compléter le workflow de traitement des données et permet de reconstituer

la population d'analyses entre ces bornes (de Fouquet, 2021). Malgré la sélection opérée pour obtenir des jeux de données représentatifs et des populations aux résultats homogènes, quelques valeurs extrêmes (ou outliers) peuvent subsister en raison d'anomalies ponctuelles naturelles ou anthropiques. Normalement en faible nombre, ces valeurs ont peu d'impact sur les résultats des calculs de détermination des valeurs de fond à l'échelle choisie. De plus, il peut être délicat de les distinguer du reste de la population et leur suppression n'est pas recommandée (Helsel, 2005). Toutefois, cette suppression peut être intégrée à l'algorithme de manière judicieuse afin d'obtenir une population plus homogène, adaptée à un traitement statistique.

4. Le calcul des valeurs de fond est réalisé par la méthode fondée sur la limite supérieure interne définie par Tukey dans la méthode des vibrisses (Tukey, 1977) par souci de pragmatisme et de cohérence avec les travaux conduits jusqu'à présent par INRAE dans le cadre du GIS Sol. Ce calcul, associé à la partie gérant les valeurs inférieures aux limites de quantification, vient compléter le workflow qui, en présence d'un effectif inférieur à 30, délivre des statistiques de base, des histogrammes, des boîtes de Tukey, ainsi que des cartes localisant les points de prélèvement. Lorsque l'effectif dépasse 30, ces informations sont complétées par des propositions de valeurs de fond (Brunet *et al.*, 2023).

3.4. Calculer des statistiques sur les sols forestiers

Bien que seuls les points présentant une occupation du sol boisée et disponibles pour la production de bois soient enquêtés, les estimateurs statistiques de l'Inventaire forestier national, notamment les estimateurs de surface, sont valides. Ainsi, il est possible de calculer, à partir des données de l'Inventaire forestier national, une estimation des surfaces des principaux types de sol avec un intervalle de confiance associé. De même, il est possible de calculer des moyennes par hectare, avec un intervalle de confiance associé, pour certains paramètres (indice de réserve en eau utile, profondeur de sondage, etc.) que ce soit par type de sol, par type de peuplement forestier ou selon d'autres critères levés ou calculés par l'IFN. Ces calculs sont réalisables grâce à un service de calcul, développé en interne à l'IGN, accessible sur internet (<https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique226>), qui s'appuie à la fois sur les données de la base d'exploitation (collectées et calculées) et sur les informations de post-stratification. Ce service, point de passage unique pour le calcul de résultats, garantit la cohérence et la fiabilité de l'exploitation statistique des données collectées. Un nombre minimal de points est toutefois requis dans chaque jeu de données sélectionné pour obtenir des résultats statistiquement significatifs.

4. VISUALISER ET DIFFUSER LES DONNÉES : VERS L'OPEN DATA

La question de la diffusion des données a été de plus en plus prégnante ces dernières années, en raison des enjeux sur les sols mais aussi de l'évolution du contexte juridique vers l'ouverture des données. Le GIS Sol a affiché explicitement dans ses dernières conventions le souhait d'une large diffusion des données acquises dans le cadre de ses programmes. Cependant, la propriété des données du SI Sol est particulièrement complexe du fait du long historique de ces programmes. De plus, la législation qui s'applique est elle-même complexe (Rennes *et al.*, 2023). Par conséquent, selon les programmes, certaines données sont diffusées en open data par INRAE ou par les partenaires régionaux du GIS Sol (e.g. certains Référentiels régionaux pédologiques, données RMQS avec coordonnées théoriques), d'autres ne sont que consultables (e.g. données BDAT), d'autres enfin ne sont pas diffusables (e.g. données RMQS avec les coordonnées réelles par exemple).

4.1. Les outils de consultation associés à DoneSol

Plusieurs outils de consultation sont disponibles à partir du site web du GIS Sol. Ils utilisent des informations décrivant les études pédologiques, à savoir :

- le répertoire des organismes intervenant en pédologie, Répédo <https://annuaire.gissol.fr/repedo>
- le répertoire des applications thématiques réalisées à partir des bases de données cartographiques sur les sols, Applicasol (Giro *et al.*, 2017) <https://annuaire.gissol.fr/applicasol>
- le répertoire des études pédologiques, Refersols <https://webapps.gissol.fr/georefersols/>.

Ces outils sont en accès libre depuis le site web du GIS Sol <https://www.gissol.fr/>.

En 2020, un important travail a été réalisé avec le RMT Sols et Territoires (Messant *et al.*, 2021) pour la création de la carte des sols dominants de France consultable sur le Géoportail <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>. Cette carte est issue de la compilation des référentiels régionaux pédologiques au 1/250 000^{ème} disponibles sur la France métropolitaine. Elle permet une interrogation des polygones avec affichage des informations descriptives des UCS et des UTS présentes. Pour des raisons juridiques, cette carte est en consultation et ne peut être téléchargée.

Dans le cadre du programme IGCS, les référentiels régionaux pédologiques (RRP) sont diffusés par les partenaires régionaux les ayant réalisés. Certains d'entre eux ont créé des outils de consultation de leur RRP. On peut citer par exemple pour la Bretagne le site <http://www.sols-de-bretagne.fr/>. Le projet Websol (Vinatier *et al.*, 2013), soutenu par un financement CASDAR

entre 2006 et 2009 puis repris par le RMT Sols et Territoires, a également développé la visualisation des RRP. Plusieurs plates-formes Websol ont ainsi été déployées en région comme, par exemple, sur la Bourgogne <https://solsdebourgogne.fr/> ou sur Rhône-Alpes <http://rhone-alpes.websol.fr/>.

Un outil de consultation des statistiques réalisées sur le RMQS a également été développé en utilisant le logiciel de statistiques R[®]. L'intérêt de ce type de technologie est la facilité et la rapidité de développement pour un résultat ergonomique et interactif <https://traitementinfosol.pages.mia.inra.fr/statistiquesrmqs/>.

4.2. L'outil de consultation des statistiques issues de la BDAT : Geosol

Geosol est une application web développée pour la consultation des données agrégées issues du programme BDAT (<https://webapps.gissol.fr/geosol/>). Elle permet d'afficher des cartes à l'échelle nationale, des statistiques sur les propriétés mesurées et stockées dans la BDAT, calculées pour différentes entités administratives. 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 (cf. 3.1). De nouvelles données étant incluses dans la BDAT chaque année, ce système permet une mise à jour fluide des données consultables. Les couches graphiques sont, quant à elles, gérées sur l'outil Geoserver de l'infrastructure de données spatialisées agroenvgeo (cf. 4.3).

4.3. Diffuser des données spatiales

La diffusion de données spatiales sur les sols est régie par le code de l'environnement et plus précisément par la directive européenne Inspire. Cela implique de s'appuyer sur une infrastructure de données spatiales (IDS) conforme aux exigences de la directive. Pour cela, les données du GIS Sol, diffusées dans ce cadre par INRAE, utilisent l'IDS agroenvgeo <https://agroenvgeo.data.inra.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/home> mise à disposition par INRAE. Elle est basée sur le logiciel Open source geOrchestra <https://www.georchestra.org/fr/> qui respecte les standards de l'Open Geospatial Consortium (OGC). Elle comprend deux outils, Geoserver pour la diffusion de données spatiales et GeoNetwork pour la diffusion des métadonnées associées. Celles-ci sont moissonnées par le Géocatalogue <https://www.geocatalogue.fr/>, point d'accès aux métadonnées publiées par les autorités publiques françaises. Cette IDS publie des services web de consultation et de téléchargement. Une chaîne de traitement a été développée pour automatiser leur publication depuis le système d'information décisionnel.

Il existe actuellement 104 fiches de métadonnées associées à plus de 250 couches graphiques. Les couches graphiques sont affichables sur le visualiseur mais aussi dans un SIG par

l'utilisation de services web au format WMS. L'outil permet également le téléchargement des données au format shapefile ou TIFF selon la nature des données, ou leur importation directe dans un SIG par l'utilisation de services web au format WFS. Les données de la première campagne de RMQS ainsi que les référentiels régionaux pédologiques dont INRAE est propriétaire sont ainsi consultables dans l'IDS.

La diffusion de certains RRP par les partenaires régionaux utilise également ce mode de diffusion au travers d'IDS régionales. On peut citer, par exemple, la diffusion de RRP d'Aquitaine par Bordeaux Science Agro sur l'IDS régionale Pigma (<https://portail.pigma.org/>) ou ceux de la région Grand Est par la Chambre régionale d'agriculture sur l'IDS régionale DataGrandEst (<https://www.datagrandest.fr/portail/fr>).

4.4. Outil de consultation des données sols de l'IFN

Le site internet de l'Inventaire forestier national, accessible à l'adresse <https://inventaire-forestier.ign.fr/>, permet d'accéder à de nombreuses données sur la forêt et les écosystèmes forestiers selon 3 principaux vecteurs d'information :

- Les tableaux standards ;
 - Les résultats ou tableaux personnalisés (outil OCRE) ;
- visualisation de la distribution cartographique des placettes répondant à certains critères (via les données brutes, outil DataFN) et/ou le téléchargement des données brutes.

Les résultats d'inventaire le plus souvent demandés sont disponibles sous la forme de tableaux standards. Ils concernent essentiellement le volume de bois, les surfaces forestières et les flux : production, mortalité et prélèvement. Un outil permet d'obtenir des résultats personnalisés, sous la forme de tableaux, accessibles aux personnes extérieures à l'IGN. Dans sa version « grand public » (<https://inventaire-forestier.ign.fr/?rubrique226>), il est possible d'effectuer des tris des données forestières (volume, surface terrière, etc.) selon des paramètres pédologiques (type de sol, type d'humus, type de roche-mère, niveau hydrique, niveau trophique calculés à partir de la flore) ou des indicateurs de sensibilité du sol issus du projet INSENSE (Augusto *et al.*, 2018) : indicateur de sensibilité du sol à l'export de biomasse ; indicateur de sensibilité du sol à l'export de calcium, de magnésium, de potassium, de phosphore et d'azote. Il est possible de calculer de nouveaux indicateurs pour répondre à d'autres besoins. Seuls les indicateurs ayant une validité nationale sont en accès grand public. Une version « Pro » de l'outil, réservée aux professionnels, permet un accès plus large et personnalisé en matière de données ou de périodes d'investigation. Son utilisation nécessite une formation, notamment pour accompagner l'utilisateur sur la validité et l'interprétation des résultats obtenus.

Les données brutes de l'Inventaire sur les sols forestiers peuvent être visualisées par l'intermédiaire de l'application DataFN : <https://inventaire-forestier.ign.fr/datafn/>. Cette application permet la visualisation de la distribution spatiale

Figure 2 : Placettes à caractère podzolique pour les campagnes d'inventaire de 2017 à 2021

Figure 2: Podzolic plots for the surveys from 2017 to 2021
N.B. : Les coordonnées géographiques fournies sont celles du centre de la maille kilométrique de la grille d'échantillonnage la plus proche du point (les coordonnées exactes de la placette d'échantillonnage se situent à 700 mètres maximum de ce centre).



des placettes répondant à certains critères. Les données correspondantes peuvent être téléchargées au format csv. A titre d'exemple, la *figure 2* montre les placettes qui présentent un sol à caractère podzolique pour les campagnes d'inventaire de 2017 à 2021.

Enfin, il est possible de télécharger l'ensemble des données brutes de l'inventaire forestier depuis 2005, y compris les données écologiques et pédologiques, via un lien disponible sur la même page que celle de l'application DatalFN. Les coordonnées exactes des placettes, protégées par diverses législations et le poids statistique des points dans l'échantillon ne figurent pas dans ces fichiers. Les indices calculés par l'IFN à partir des données pédologiques et floristiques sont disponibles à l'adresse suivante : <https://inventaire-forestier.ign.fr/?rubrique262>. Outre les niveaux trophiques et hydriques, calculés à partir de la flore, les indices d'hydromorphie, de texture et de réserve utile sont aussi proposés.

4.5. Diffuser les données sur les sols urbains

Les premiers résultats issus du workflow de traitement des données BDSolU seront prochainement disponibles. Ils seront préétablis par le BRGM pour des zones géographiques présentant un nombre suffisant d'analyses pour permettre le calcul statistique des FPGA (Brunet *et al.*, 2023).

Les informations accessibles comprendront pour chaque élément ou substance analysé : des statistiques de base (moyenne, médiane, écart-type, quantiles...); des histogrammes et des boîtes de Tukey (Tukey, 1977) représentant la distribution de la population après sélection lors du workflow; des cartes représentant les points de prélèvement à une échelle ne permettant pas leur localisation exacte (pour des raisons de confidentialité); des valeurs de fonds pédogéochimiques (sous réserve d'une population d'effectif supérieur à 30).

Une interface interactive permettra à terme de diffuser les valeurs de fonds pédogéochimiques anthropisés (www.bdsolu.fr). Il est prévu de fournir des valeurs de FPGA déterminées en temps réel : par zone géographique, selon diverses échelles possibles (quartier, ville, agglomération urbaine); par profondeur, selon les objectifs de l'étude conduite (enjeux sanitaires en cas d'exposition directe, valorisation de terres excavées, etc.), par paramètre (métaux, métalloïdes, composés organiques persistants). L'obtention en temps réel de ce type de carte fait appel à des méthodes d'interpolation statistiques et/ou géostatistiques et à des algorithmes experts qui sont en cours de développement.

4.6. Diffuser les données en open data : vers l'interopérabilité

Dans le cadre de sa politique de science ouverte, INRAE s'est doté, en 2018, d'un portail de partage de données pour faciliter la gestion, le partage et la recherche des données et

répondre aux obligations réglementaires françaises en matière d'ouverture des données. Ce portail repose sur la technologie dataverse. Il est, depuis 2022, inséré dans le portail des données de la recherche française (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr>).

Le GIS Sol a créé, dès 2018, une collection, dossier dans lequel on publie des jeux de données ou datasets (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/gissol>). En août 2022, 21 jeux de données y ont été publiés, un jeu de données pouvant contenir un ou plusieurs fichiers ou seulement indiquer un lien vers des fichiers (comme par exemple vers l'IDS).

Un des avantages de ce portail est la création automatique de DOI (*digital object identifier*) qui aident à mieux identifier et citer les jeux de données (publications scientifiques, projets opérationnels...) et tracer leurs réutilisations. Cependant, pour les données géographiques, la publication dans la collection et dans l'IDS pose des problèmes d'hétérogénéité entre les deux modes de diffusion, due à des problématiques organisationnelles et techniques : hétérogénéité dans les formats de diffusion (par exemple GeoTIFF dans la collection GIS Sol et standards WMS/WFS dans l'IDS), hétérogénéité dans les métadonnées et entre les versions des jeux de données. Un travail d'homogénéisation est en cours ainsi que le développement d'un workflow de publication qui permettra de publier de manière homogène les données et les métadonnées sur la collection GIS Sol et sur l'IDS.

Mettre des fichiers en téléchargement ne permet pas de remplir toutes les obligations relatives à l'ouverture des données. En effet, il est attendu que ces données répondent aux principes FAIR : facile à trouver, accessible, interopérable et réutilisable. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des technologies qui permettent une réelle interopérabilité. L'IDS permet l'interopérabilité des données spatiales mais il reste du travail pour y parvenir pleinement, notamment sur la description des propriétés observées. Cette préoccupation rejoint celle de la diffusion de données tabulaires. Deux pistes sont explorées actuellement par l'Unité Info&Sols d'INRAE :

- l'utilisation de l'API SensorThings (OGC, 2022) qui permet de diffuser des données selon le standard Observations and Measurements de l'OGC.
- l'utilisation des technologies du web sémantique selon les standards du W3C où sont repris des outils (pipeline Coby) développés dans le cadre de l'infrastructure nationale sur les analyses et expérimentations sur les écosystèmes continentaux (AnaEE France).

L'API SensorThings a été développée pour apporter une structure standardisée permettant l'interconnexion des données issues de capteurs, de données ou d'applications web. Elle facilite également l'intégration des données dans des infrastructures de données spatialisées ou des systèmes d'information géographique préexistants. Pour publier les données du GIS Sol via l'API SensorThings, l'Unité Info&Sols d'INRAE a développé ses propres outils, libres et open-source, restant ainsi dans la philosophie de l'open data (*figure 1*):

- SensorMap : pour structurer les données issues de la base de données DoneSol au format requis par l'API. Les données sont extraites de la base, transformées et publiées vers un serveur Frost sous forme de JSON, utilisable par des machines.
- SensorBoard : pour visualiser les données issues du serveur Frost dans un format lisible et intelligible par les humains, et en permettre une représentation cartographique, une édition, création ou suppression de données.
- MapGo : pour fédérer des données au format SensorThings issues de différentes bases et hébergées sur différents serveurs au travers d'une interface cartographique.

Un test a été réalisé montrant la capacité d'interopérabilité des données de DoneSol, de l'IRD et du Cirad via l'API Sensorthings autour des données sur le carbone du sol en Guyane (projet ANR Data4C+, 2018-2021, coordination Cirad, <https://www.data4c-plus-project.fr/>). Un autre test d'interopérabilité des données DoneSol a été réalisé avec la base de données BDSolU (projet FGU III - Etablissement de fonds pédogéochimiques urbains, convention Ademe, 2018-2023, coordination BRGM et projet SUPRA - Sols Urbains et Projets d'Aménagement, de l'échantillonnage des sols à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols, 2018-2021, coordination Laboratoire Sols et Environnement de l'Université de Lorraine) (SUPRA, 2021). En effet, les deux bases de données sont complémentaires du point de vue des analyses réalisées, DoneSol pouvant contenir des analyses de substances potentiellement polluantes et BDSolU des analyses sur la qualité des sols agricoles ou sur leur capacité à stocker du carbone, mais aussi du point de vue géographique, DoneSol couvrant plutôt des espaces ruraux et BDSolU des espaces urbains. L'objectif est de mettre en place un langage commun aux deux bases de données afin de permettre leur interrogation simultanée. L'utilisation de SensorThings permet de décrire les données via le même modèle de données, avec des recodages en amont pour que les propriétés observées soient décrites de la même manière.

Le web sémantique, tel que défini par le W3C qui en développe les technologies, fournit une structure commune qui permet aux données d'être partagées et réutilisées malgré les frontières entre les applications, les entreprises et les communautés. La diffusion des données selon le web sémantique repose sur le modèle standard RDF (*Resource Description Framework*). Ce modèle se présente sous la forme de triplet composé d'un sujet, d'un prédicat et d'un objet : le sujet représente la ressource à décrire (e.g. un profil), l'objet est une autre ressource permettant de décrire le sujet (e.g. un horizon), le prédicat détermine en quoi l'objet décrit le sujet, à savoir la relation qui lie les deux ressources entre elles, ainsi que la direction de cette relation (e.g. contient). Chaque élément du triplet est relié à un identifiant unique, l'URI (Uniform Resource Identifier) qui permet à l'ensemble des triplets RDF de définir un graphe orienté et annoté dans lequel sujets, prédicats et objets sont définis, décrits et réutilisables. Pour permettre une description standardisée

des données dans le web sémantique, une ontologie adaptée doit être développée pour modéliser les concepts associés aux données. La diffusion des données du GIS Sol dans le web sémantique est en cours. Il s'appuie technologiquement sur les outils développés dans le cadre d'AnaEE France, notamment fondé sur le pipeline d'annotation sémantique Coby qui, à partir d'une modélisation des données sous forme d'annotation sémantique, les publie dans un système de gestion de graphes de données (Blazegraph) et les stocke sous forme de triplets RDF dans un « triplestore ». La modélisation des données et l'ontologie à utiliser sont des points essentiels qui sont en cours d'élaboration, car il n'existe actuellement pas d'ontologie spécifique aux données sur les sols. Ces travaux s'appuient sur des standards technologiques favorisant l'interopérabilité, et fournissent une ou plusieurs implémentations sous forme de projets open-source, leurs buts étant la simplification du partage et de la réutilisation des données entre plusieurs applications et/ou systèmes d'information.

L'intérêt de ces technologies est de pouvoir diffuser les données avec leur description (métadonnées) permettant ainsi une totale interopérabilité. Un effort amont est nécessaire pour que ces métadonnées soient non seulement les plus précises et détaillées possibles, mais également pour qu'elles s'appuient sur des vocabulaires contrôlés et des ontologies dans le cadre du web sémantique.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En plus de 20 ans, la connaissance sur les sols s'est considérablement améliorée grâce aux actions du GIS Sol. Les efforts ont été faits en matière d'acquisition mais aussi de gestion, d'analyse et de diffusion des données. Ils ont permis d'augmenter l'intérêt de multiples acteurs pour les données sur les sols. Des efforts subsistent pour répondre aux enjeux actuels. En matière de capitalisation, de nouveaux types de données sont à prendre en compte, comme les données de biodiversité ou celles issues des sciences participatives. L'intérêt pour les sols urbains est grandissant et demandera un effort important de capitalisation pour pouvoir répondre aux besoins des métropoles. Les premiers travaux de cartographie à modélisation statistique rencontrent un fort intérêt des utilisateurs, parce qu'à échelles fines, mais l'offre est encore trop faible. La mise à disposition des données est encore vue comme trop complexe et trop dispersée. Le développement et la maintenance des bases de données, et le développement de l'opérationnalité des workflows de traitement doivent se poursuivre pour augmenter l'offre de données traitées et améliorer la diffusion des données, pour les rendre plus FAIR, pour progresser dans une offre plus générique, moins attachée à chacun des programmes d'acquisition des données du GIS Sol. Cela nécessite des moyens conséquents dans un contexte d'évolution des technologies toujours plus rapide.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs remerciements à l'ensemble des partenaires du GIS Sol pour leur contribution à la collecte, la gestion, l'analyse et la diffusion des données du GIS Sol.

Ils tiennent également à remercier les relecteurs François Hissel et Hervé Squidant pour leur relecture attentive et leurs commentaires ayant permis d'améliorer significativement le manuscrit de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Ademe (2018). Méthodologie de détermination des valeurs de fonds dans les sols : Echelle d'un site/d'un territoire. Groupe de travail sur les valeurs de fonds. 107 p. <https://bibliothèque.ademe.fr/sols-pollues/32-guide-pour-la-determination-des-valeurs-de-fonds-dans-les-sols-echelles-d-un-territoire-d-un-site.html>
- Augusto L., Pousse N., Legout A., Seynave I., Jabiol B., Levillain J. (2018). INSENSE : Indicateurs de SENSibilité des Ecosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse. Rapport de recherche. ADEME. 262 p. [hal-03023040]
- Arrouays D., Stengel P., Feix I., Lesaffre B., Morard V., Bardy M., Bispo A., Laroche B., Caquet T., Juille F., Rabut M., Soussana J.-F., Voltz M., Gascuel-Odoux C. (2022). Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années, *Étude et Gestion des Sols*, 29, 365-379. <https://hal.inrae.fr/hal-03815433>.
- Baize D., Saby N.P.A., 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, pp. 181-200. <https://hal.inrae.fr/hal-02655076>.
- Beaudou A., Le Martret H. (2004). MIRURAM/VALSOL : un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. *Étude et Gestion des Sols*, 11, 3, pp. 271-284.
- Belbèze S., Rohmer J., Nègre P., Guyonnet D. (2023). Defining urban soil geochemical backgrounds: A review for application to the French context. *Journal of Geochemical Exploration*, 254, 107298. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107298>
- Bertrand R., Falipou P., Legros J.-P. (1979) Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banque de données. STIPA 1979. INRA - IRAT, Montpellier. 119 p.
- Brossard M., Fujisaki K., Jolivet C., Dupuits-Bonnin E., Jameux M., Jalabert S., Toulemone Le Ny E., Becquer T., Blavet D., Beaudou A., Boulonne L., Desjardins T., Le Martret H., Ratié C. (2023). Le GIS Sol dans les départements et régions d'Outre-mer français. *Étude et Gestion des Sols*, 30, pp. 145-168. <https://hal.inrae.fr/hal-03962807>
- Brunet J.-F., Branchu P., Eychene C., Belbèze S., Guyonnet D. (2023). L'offre du GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain, *Étude et Gestion des Sols*, 30, pp. 195-206, <https://hal.science/hal-04056942/>
- Chapuis A., Toutain B., Chenu J.-P., Laroche B. (2013). Sivercoh, une application web pour vérifier la cohérence des bases de données pédologiques. Séminaire National IGCS « Inventaire, Gestion et Conservation des Sols », Rennes, France, 11-13/12/2013. <https://hal.inrae.fr/hal-03753031>
- Chen S., Arrouays D., Mulder V.L., Poggio L., Minasny B., Roudier P., Libohova Z., Lagacherie P., Shi Z., Hannam J., Meersmans J., Richer-de-Forges A.C., Walter C. (2022). Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*, 409, 115567. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115567>
- De Grijter J., Brus D.J., Bierkens M.F., Kotters M. (2006). Sampling for natural resource monitoring. Springer Science & Business Media. 334 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-33161-1>.
- Duchaufour P. (1991). Pédologie. Sol, végétation, environnement, troisième édition. Paris, Masson, 289 p.
- Fouquet (de) C. (2021). Vibrisse de Tukey et limites de quantification - Notes Mines Paris-Tech établie dans le cadre du projet « Etablissement de fonds pédogéochimique urbain (FGU) - 3^e convention 2019-2023). Ademe, 8 p.
- Gaultier J.-P., Legros J.-P., Bornand M., King D., Favrot J.-C., Hardy R. (1993). L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées : le projet DONESOL. *Revue de géomatique*, 3, 3, pp. 235-253. <https://hal.science/hal-02703961v1>
- Giroit G., Millet F., Schnebel 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, pp. 33-43 <https://hal.inrae.fr/INFOSOL/hal-02619353>
- 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. *Étude et gestion des sols*, 11, 3, pp. 255-269.
- Helsel D. (2005). Nondetects And Data Analysis: Statistics for Censored Environmental Data. John Wiley & Sons. 250 p.
- Jabiol B., Brethes A., Ponge J.-F., Toutain F., Brun J.-J. (1995). L'humus sous toutes ses formes, première édition. ENGREF, 64 p.
- Le Martret H., Beaudou A., Blanca Y., Brossard M., Le Rouget Zuritta B. (2008). Interface web cartographique de visualisation des données pédologiques. *Le Monde des Cartes : Revue du CFC*, 197, pp. 31-36. fdi:010044925
- Lehmann J., Bossio D.A., Kögel-Knabner I., Rillig M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nat Rev Earth Environ*, 1, pp. 544-553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Loiseau T., Richer-de-Forges A.C., Roudier P., Ducommun C., Chen S., Lagacherie P., Arrouays D. (2020). Essais de représentation cartographique de l'incertitude pour les utilisateurs de cartographies des sols par modélisation statistique. *Étude et Gestion des Sols*, 27, pp. 257-275. <https://hal.inrae.fr/INFOSOL/hal-03141430>
- MEEM (2018). Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/methodologie-nationale-gestion-sites-sols-pollues>
- MEFSIN (2022). Fonds pour le recyclage des friches. Ministère de l'Economie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique. <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relande/mesures/fonds-recyclage-friches>
- Messant A., Lehmann S., Moulin J., Lagacherie P., Jalabert S., Noraz A., Lemerrier 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, pp. 57-69 <https://hal.inrae.fr/INFOSOL/hal-03121194>
- MTECT (2022). Sites et sols pollué. L'article 173 de la loi ALUR. Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. https://www.ecologie.gouv.fr/sites-et-sols-pollues#scroll-nav__5
- OGC (2022). SensorThings - Introduction. <http://openeospatial.github.io/e-learning/sta/text/main.html>
- 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, pp. 253-262. <https://hal.inrae.fr/hal-04018933>
- Richer-de-Forges A.C., Laroche B., Lehmann S., Chenu J.-P., Boukir H., Perrier C. (2018). Les offres de formations à DoneSol. 14e Journées d'Etude des Sols : « Le sol au cœur des enjeux sociétaux », Rouen, France, 9-12 juillet 2018. <https://hal.inrae.fr/hal-02738427>
- Román Dobarco M., Bourennane H., Arrouays D., Saby N.P.A., Cousin I., Martin M.P. (2019). Uncertainty assessment of GlobalSoilMap soil available water capacity products: A French case study. *Geoderma*, 344, pp. 14-30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.036>
- Saby N.P.A., Lemerrier B., Arrouays D., Leménager S., Louis B., Millet F., Paroissien J.-B., Schellenberger E., Squidant H., Swiderski C., Toutain B., Walter C., Bardy M. (2014). Le programme Base de Données des

- Analyses de Terre (BDAT): Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Etude et Gestion des Sols*, 21, pp. 141-150. <https://hal.science/hal-01209243>
- Saby N.P.A., Marchant B.P., Arrouays D., Jolivet C. (2018). Spatial predictions of total and exchangeable trace elements content in France. <https://doi.org/10.15454/VN9F6H>, Recherche Data Gouv, V3
- Sauvaget B., de Fouquet C., Le Guern C., Renard D., Roussel H. (2022). Geostatistical filtering to map a 3D anthropogenic pedo-geochemical background for excavated soil reuse. *Journal of Geochemical exploration*, 240, 107031, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107031>
- Supra (2021). Sols urbains: les caractériser pour aider la décision de leur affectation lors des projets d'aménagement. <https://expertises.ademe.fr/content/supra-sols-urbains-projets-damenagement>
- Toutain B. (2013). Evolution du système d'information Donesol. Séminaire IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols), Rennes, France, 11-13 décembre 2013. 14 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02805037>
- Tukey J.W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company. 688 p.
- Vie Publique (2015). Loi du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République. <https://www.vie-publique.fr/loi/20721-loi-notre-loi-du-7-aout-2015-nouvelle-organisation-territoriale-de-la>
- Vinatier J.-M., Chafchafi A., Bargeot L., Toutain B., Laroche B., Arrouays D., Squidant H. (2013). Websol : une plateforme Internet de diffusion des données pédologiques. *Etude et Gestion des Sols*, 20, 3, pp. 7-18. <https://hal.science/hal-01209115>
- Wilkinson M.D., Dumontier M., Aalbersberg I.J., Appleton G., Axton M., Baak A., Blomberg N., Boiten J.-W., da Silva Santos L. B., Bourne P.E., Bouwman J., Brookes A.J., Clark T., Crosas M., Dillo I., Dumon O., Edmunds S., Evelo C.T., Finkers R., Gonzalez-Beltran A., Gray A.J.G., Groth P., Goble C., Grethe J.S., Heringa J., Hoen P.A.C.'t, Hooft R., Kuhn T., Kok R., Kok J., Lusher S.J., Martone M.E., Mons A., Packer A.L., Persson B., Rocca-Serra P., Roos M., van Schaik R., Sansone S.-A., Schultes E., Sengstag T., Slater T., Strawn G., Swertz M.A., Thompson M., van der Lei J., van Mulligen E., Velterop J., Waagmeester A., Wittenburg P., Wolstencroft K., Zhao J., Mons B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3, 1, 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>

Prendre en compte le statut juridique des données dans les programmes du GIS Sol

S. Rennes^(1*), C. Le Bas⁽²⁾, S. Le Bideau⁽³⁾ et F. Hissel⁽⁴⁾

1) INRAE - Direction des affaires juridiques (DAJ) - 147 rue de l'Université - 75007 Paris, France

2) INRAE - Info&Sols - 2163 av. de la Pomme de Pin - CS 40001 Ardon - 45075 Orléans Cedex 2, France

3) BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières - 3 av. Claude-Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2, France

4) OFB - Office français de la Biodiversité - 12 Cours Lumière - 94300 Vincennes, France

* Auteur correspondant : stephanie.rennes@inrae.fr

RÉSUMÉ

Prendre en compte le statut juridique des données dans les programmes du GIS Sol implique d'identifier des régimes juridiques différents. La plupart des programmes du GIS Sol (IGCS, RMQS et BDAT) présentent des similitudes qui facilitent l'analyse juridique du statut de ces données, souvent issues du prélèvement d'un élément matériel et concret, l'échantillon de sol. Une approche pas à pas, suivant le cycle de vie de la donnée (collecte, analyse et traitement, modalités de diffusion), peut également être utile, dans le sens où elle permet d'appairer les points de vigilance juridiques avec les étapes du cycle de vie de la donnée, grâce à un outil tel que le plan de gestion des données (PGD). Des initiatives nationales ou européennes se développent pour guider les différents acteurs des « données sol », producteurs et utilisateurs, des secteurs privé et public, dans leur compréhension des enjeux juridiques liés à la collecte et au partage de ces données. À l'échelle du GIS Sol, un groupe de travail juridique a été créé afin de proposer des solutions pratiques adaptées aux besoins des producteurs et des utilisateurs, en tenant compte des profondes mutations réglementaires en cours. Le groupe étendra ses travaux à l'étude des spécificités d'autres programmes du GIS Sol : BDSolU (base de données des analyses de sols urbains) et BDETM (base de données d'analyses des éléments traces métalliques).

Mots-clés

Donnée, sol, juridique, environnement, open data, Europe, partenariat

Comment citer cet article :

Rennes S., Le Bas C., Le Bideau S. et 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

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

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

SUMMARY**SOIL DATA WITHIN THE GIS SOL: A legal perspective**

Taking into account the legal status of data in GIS Sol programs involves identifying different legal regimes. Most of the GIS Sol programs (IGCS, RMQS and BDAT) have shown similarities that facilitate the legal analysis of the status of their data, which are often issued from material soil samples. A step-by-step approach, following the « data lifecycle » (collection, processing, methods of dissemination), can also be useful, as it makes it possible to pair the legal points of vigilance with each stage of the data lifecycle, via the data management plan (DMP). National and European initiatives are currently implemented with an aim to guide the various “soil data” stakeholders, producers and users, from economic and public sectors, in their understanding of the legal issues related to the collection and sharing of these data. A legal working group has been created within the GIS Sol in order to propose practical solutions adapted to the needs of producers and users, throughout the current regulatory evolution. The group will also extend its work to the specificities of other GIS Sol programs: BDSolU and BDETM.

Key-words

Data, soil, legal, environment, open data, Europe, partnership.

RESUMEN**TOMAR EN CUENTA EL ESTATUTO JURÍDICO DE LOS DATOS EN LOS PROGRAMAS DEL GIS SOL**

Tomar en cuenta el estatuto jurídico de los datos en los programas del GIS Sol implica identificar regímenes jurídicos diferentes. La mayoría de los programas del GIS Sol (IGCS, RMQS y BDAT) presentan similitudes que facilitan el análisis jurídico de la situación de estos datos, a menudo derivados de la toma de un elemento material y concreto, la muestra de suelo. Un enfoque paso a paso, según el ciclo de vida del dato (recogida, análisis y tratamiento, modalidades de difusión), puede también ser útil, en el sentido de que permite relacionar los puntos de vigilancia jurídica con las etapas del ciclo de vida del dato, mediante una herramienta como el plan de gestión de datos (PGD). Se están desarrollando iniciativas nacionales o europeas para guiar a los diferentes actores de los «datos de suelo», productores y usuarios, de los sectores privado y público, en su comprensión de los retos jurídicos vinculados a la recogida y al intercambio de estos datos. A escala del GIS Sol, se creó un grupo de trabajo jurídico para proponer soluciones prácticas adaptadas a las necesidades de los productores y los usuarios, teniendo en cuenta los profundos cambios reglamentarios en curso. El grupo ampliará sus trabajos para estudiar las especificidades de otros programas del GIS Sol: BDSolU (base de datos de análisis de suelos urbanos) y BDETM (base de datos de análisis de elementos traza metálicos).

Palabras clave

Datos, suelo, jurídico, medio ambiente, open data, Europa, colaboración.

Les sols sont au cœur de nombreux enjeux agricoles et environnementaux comme la production alimentaire de qualité, la pollution des eaux et de l'air, le changement climatique et le maintien de la biodiversité, mais aussi la santé humaine, pour n'en citer que quelques exemples. La connaissance des sols et de l'évolution de leur qualité est donc nécessaire pour mener à bien les politiques agricoles, environnementales et de santé publique. L'accès aux données sur les sols devient primordial, tandis que les attentes sociétales en la matière se font croissantes (accès aux données publiques, aux données et aux informations relatives à l'environnement, transition écologique, santé des sols, limitation de l'artificialisation des terres, etc.).

En France, le groupement d'intérêt scientifique sur les sols (GIS Sol, <https://www.gissol.fr>) consolide, dans un système d'information, l'ensemble des données des programmes nationaux d'inventaire et de surveillance de la qualité des sols. Pour la plupart de ces programmes, l'acquisition des données nécessite l'usage de méthodes invasives dans les sols de propriétés privées, impliquant le recueil d'échantillons et la production de données associées. Les programmes du GIS Sol engagent donc, comme nous le verrons plus loin, des éléments de natures matérielle (échantillons) et immatérielle (données).

En 2021, le GIS Sol a fêté ses 20 ans. 20 ans de programmes nationaux pour mieux connaître les sols français, au cœur desquels les données occupent une place prépondérante. La consultation du site internet du GIS Sol éclaire le lecteur, en quelques mots, sur les particularités du sol, objet des missions du GIS : « *le sol est un milieu en interface avec l'eau, l'air, la roche, le vivant. C'est un milieu complexe et hétérogène. Ses propriétés évoluent dans le temps. Mais il est aussi le principal support des activités humaines* ».

Les programmes du GIS Sol ont pour objet l'étude du sol, « *milieu complexe et hétérogène* », et de l'évolution de ses propriétés, en France. Les données issues du traitement des échantillons de sol et mobilisées dans ce cadre sont généralement le reflet de cette complexité et de cette hétérogénéité.

Sur le plan juridique, les « données sol » peuvent être observées de deux manières : du point de vue de leur nature et de leur usage, d'une part, du point de vue des acteurs qui les produisent et les utilisent, d'autre part.

- **Nature et usage de la donnée sol :** il convient de préciser que, au sein du GIS Sol, le terme « données sol » recouvre des réalités et des actions techniques et scientifiques variées : données pédologiques d'observation décrites sur des sites d'observation dits « profils de sol » (sondages à la tarière, fosses pédologiques), données agronomiques, données issues d'analyses chimiques, physiques ou biologiques à partir d'échantillons de sol, données statistiques ou géostatistiques, données de synthèse cartographique, prises de vues, mesures manuelles ou issues de capteurs, numérisation. Les données sol sont gérées dans des systèmes d'information, en vue de

la production d'outils destinés à faciliter la compréhension des sols (cartographies, modélisation, etc.) ou à documenter leurs évolutions selon les usages (indicateurs de la qualité des sols). La nature des données sol varie par ailleurs selon les différents usages du sol : le GIS Sol intègre en effet, par le biais de programmes dédiés, des données relatives à des sols agricoles, forestiers et/ou urbains. La propriété des données et les contraintes juridiques pouvant peser sur leur diffusion ont des implications sur les différents usages des données sol. Par exemple, selon l'usage et le type d'acteur concerné, la donnée sol peut être considérée comme une véritable ressource, dont l'exploitation est susceptible de mettre en jeu des mécanismes juridiques tels que la protection du secret des affaires (Assemblée nationale *et al.*, questionnaire à B. Lasserre, 2022).

- **Acteurs de la donnée sol :** le sol étant « *le principal support des activités humaines* », les acteurs de la donnée sol impliqués dans les activités du GIS sol sont également divers. Producteurs et utilisateurs de données, ils peuvent être : propriétaires et exploitants fonciers ; professionnels et experts des filières agricoles et des territoires (exploitants agricoles, chambres d'agriculture, aménageurs urbains, bureaux d'études...) ; chercheurs des secteurs public et privé ; structures administratives et professionnelles, institutions nationales ou internationales (ministères, établissements d'enseignement et de recherche, collectivités, établissements fonciers, syndicats et coopératives, Commission européenne, FAO...).

Le constat de cette hétérogénéité permet-il de dégager un profil juridique de la donnée sol ? Ou, au contraire, lui confère-t-il un statut juridique tout aussi « complexe et hétérogène » ?

Comme beaucoup d'autres données, les données sol font l'objet d'un cycle d'actions (collecte, bancarisation, contrôle de leur qualité, traitement, diffusion, interprétation, réutilisation, ...), pouvant entrer dans ce que l'on dénomme le « cycle de vie de la donnée » (CNRS, 2021 ; Batifol *et al.*, 2021). Que l'on aborde le sujet par l'entrée « nature/usages de la donnée » ou par l'entrée « acteurs », la gestion de la donnée sol génère des questions récurrentes tout au long de son cycle de vie : qui est propriétaire de la donnée ? Qui peut l'utiliser ? Le statut public ou privé de l'acteur (producteur ou utilisateur) a-t-il une influence sur la gestion de la donnée ?

Le présent article ne prétend pas être exhaustif, le sujet méritant à lui seul une étude juridique approfondie et en cours dans le cadre d'un groupe de travail du GIS Sol, mais il vise à donner quelques repères pour aider à clarifier la compréhension des enjeux liés aux données sol.

Rappelons en quelques lignes les principaux enjeux liés aux données sol dans le cadre du GIS.

Le sol étant lié au foncier, l'acquisition de données sur les sols s'effectue majoritairement dans des propriétés privées, ce qui implique d'obtenir l'accord des propriétaires

et, le cas échéant, celui des exploitants, y compris pour les étapes ultérieures de diffusion et d'exploitation des données recueillies (s'agissant de l'accès « à la propriété privée rurale ou forestière d'autrui » et lorsque « le caractère privé du lieu est matérialisé physiquement », voir les dispositions de l'article 226-4-3 du Code pénal). Parfois, les données sur les sols peuvent être considérées comme relevant du secret des affaires dans un certain nombre de cas : pour les exploitants agricoles dont l'activité économique dépend de ces données (données agronomiques représentant un savoir-faire), mais aussi pour les laboratoires d'analyses de sol dans le cadre du programme BDAT (les analyses de sol constituant pour chaque laboratoire un socle d'information leur permettant de formuler des conseils agronomiques à leurs clients par exemple). Sans compter le fort intérêt, lié au coût d'acquisition des données, que représente l'utilisation de données anciennes obtenues dans un contexte juridique tout aussi ancien et différent du contexte actuel.

Une fois ces enjeux exposés, quelques pistes peuvent être proposées pour prendre en compte le statut juridique des données sol dans les programmes du GIS Sol.

Une première série de pistes est le constat que les programmes du GIS Sol mobilisant des données présentent des similitudes juridiques. Les données sol que ces programmes mobilisent peuvent en effet être soumises à une combinaison de cadres juridiques, applicables notamment à leur accès. Elles peuvent également être concernées par des politiques publiques, nationales ou européennes, et sont souvent au cœur de partenariats entre acteurs divers.

Une piste complémentaire, qui ne fera pas l'objet d'un développement complet dans cet article, consiste à proposer d'utiliser l'approche du « cycle de vie de la donnée » (collecte,

traitement, diffusion, interprétation et utilisation) pour en dégager de bonnes pratiques, ce qui est rendu possible par le recours au plan de gestion des données.

1. LES DONNÉES SOL : LES SIMILITUDES JURIDIQUES

Bien que différents dans leurs objets et dans leur mise en œuvre, les programmes du GIS Sol, en particulier l'Inventaire Gestion et Conservation des Sols (IGCS), le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) et la Base de Données d'Analyses de Terre (BDAT) présentent, sur le plan juridique, trois points communs, résumés dans le *tableau 1* :

- Une combinaison de dispositifs juridiques.
- La collecte et la gestion d'éléments matériels et immatériels.
- Le développement de partenariats.

Les informations relatives à l'environnement

Les données obtenues dans le cadre des différents programmes du GIS Sol sont des informations environnementales.

Pour mémoire, une information relative à l'environnement est constituée de « *toute information disponible, quel qu'en soit le support, concernant : 1° L'état des éléments de l'environnement, [...] notamment, [...] le sol, les terres (...). 2° Les décisions, les activités et les facteurs, notamment les substances, [...] les émissions, les déversements et autres rejets, susceptibles d'avoir des incidences sur l'état des éléments visés au 1°* » (article L. 124-2 du code de l'environnement). Deux régimes légaux sont prévus : d'une part, l'accès aux informations relatives à l'environnement et, d'autre part, l'accès aux informations

Tableau 1 : des lignes juridiques communes entre les programmes du GIS Sol

Table 1: Focus on legal similarities between the GIS Sol programs.

Une combinaison de régimes juridiques	La collecte et la gestion d'éléments matériels et immatériels	Les partenariats
Il s'agit principalement des régimes suivants : - Informations relatives à l'environnement. - Données géographiques liées à l'environnement (Directive européenne INSPIRE) - Documents administratifs et données publiques. Complétés, selon les cas, par : - Le droit des données à caractère personnel, prévu notamment par le règlement général sur la protection des données (RGPD). - Le droit relatif à la protection de la biodiversité. - Le droit de la propriété intellectuelle.	Les échantillons et les données.	Une composante partenariale multi-acteurs forte, qui nécessite la signature de conventions.

+ Politiques publiques : Politique publique de la donnée, Plan national « Science ouverte », Stratégie nationale biodiversité 2030 ...

relatives aux émissions de substances dans l'environnement (articles L. 124-4 et L. 124-5 du même code).

Une circulaire ministérielle du 11 mai 2020 précise les modalités d'accès aux informations environnementales (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2020). En matière d'accès aux informations environnementales, la communication est le principe, le refus l'exception. Par exemple, les informations relatives à des émissions de substances dans l'environnement ne sont communicables que si elles ne portent pas atteinte à la sécurité publique ou aux droits de propriété intellectuelle d'un tiers.

Les données géographiques liées à l'environnement

La Directive INSPIRE (2007) établit une « infrastructure d'information géographique ». Elle a fait l'objet en 2021 d'une consultation en vue de son évaluation (https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12427-Partage-de-donnees-geospatiales-sur-l%E2%80%99environnement-Evaluation-directive-INSPIRE-/public-consultation_fr). À l'heure actuelle, les dispositions juridiques relatives à cet encadrement technique (services de recherche, consultation, téléchargement, transformation des données) sont transposées, en France, dans le code de l'environnement (articles 127-1 et suivants, avec des renvois vers le code des relations entre le public et l'administration). Au sens de la directive INSPIRE, les données géographiques concernées sont « détenues par une autorité publique, ou en son nom, sous format électronique, relatives à une zone sur laquelle la France détient ou exerce sa compétence et concernant un ou plusieurs thèmes figurant aux annexes I, II et III de la directive INSPIRE ».

Ces annexes recouvrent des thèmes très variés comme les référentiels de coordonnées, les adresses, les caractéristiques des sols et du sous-sol. Si l'on considère la définition du thème « sols » de la directive, la totalité des données du GIS Sol sont des données géographiques entrant dans le champ d'application de ce texte.

L'accès à ces données est encouragé, sous réserve d'exceptions telles que celles prévues en matière de protection de l'environnement. À titre d'exemple, l'article L.124-4 du code de l'environnement indique que « l'autorité publique peut rejeter la demande d'une information relative à l'environnement dont la consultation ou la communication porte atteinte (...) à la protection de l'environnement auquel elle se rapporte ».

Le régime des données publiques et des données ouvertes

Sous réserve d'exceptions, l'« open data » des données détenues par le secteur public est la règle. Une définition générique de l'« open data » est proposée par la CNIL et

la CADA: « Littéralement « donnée ouverte », ce terme générique renvoie à la fois aux politiques d'ouverture des données mais également aux données ouvertes elles-mêmes c'est-à-dire les données du secteur public ou du secteur privé, indépendamment du fait qu'elles aient été produites dans le cadre de l'exécution d'une mission de service public, librement accessibles en ligne dans un format compréhensible, non-propriétaire permettant une réutilisation relativement libre » (CADA et CNIL, 2019). À noter que, s'agissant des données du secteur public, le principal élément déclencheur de l'open data est la détention des données par l'administration, que ce soit du fait d'une production ou suite à leur réception par cette administration. Ainsi, ce qui est détenu par une administration est présumé être un « document administratif ». Seule la présence avérée d'exceptions peut faire obstacle à leur ouverture (voir les articles L. 300-1, L. 300-2 et L. 311-1 du CRPA). En France, les textes juridiques de référence sont principalement le code des relations entre le public et l'administration (CRPA), le code de la recherche (pour les administrations concernées), le code de l'environnement, ainsi que le code de la propriété intellectuelle.

Sont concernés par ce cadre juridique, « *quels que soient leur date, leur lieu de conservation, leur forme et leur support, des documents produits ou reçus, dans le cadre de leur mission de service public, par l'Etat, les collectivités territoriales ainsi que par les autres personnes de droit public ou les personnes de droit privé chargées d'une telle mission* ». Organisé autour des principes directeurs d'ouverture, de gratuité et de libre réutilisation par le public, ce régime a pour objectif d'abolir toute barrière (financière, technique...) d'accès aux données publiques. Dans les textes juridiques, le terme « réutilisation » a un sens précis. Il s'agit de la réutilisation par le public, défini par le code des relations entre le public et l'administration (CRPA) comme « a) toute personne physique ; b) toute personne morale de droit privé, à l'exception de celles qui sont chargées d'une mission de service public lorsqu'est en cause l'exercice de cette mission » (voir l'article L. 100-3 du CRPA).

À noter que, au plan européen, la Directive 2019/1024/CE du 20 juin 2019 concernant les données ouvertes et la réutilisation des informations du secteur public établit « *une liste des catégories thématiques d'ensembles de données de forte valeur* ». Cette directive est complétée par le Règlement d'exécution (UE) 2023/138 de la Commission du 21 décembre 2022 établissant, notamment, une liste d'ensembles de données de forte valeur spécifiques et « les modalités de publication et de réutilisation » de ces données, en particulier les conditions applicables en matière de réutilisation et les exigences minimales pour la diffusion des données au moyen d'interfaces de programmation d'applications (API). Cette réglementation s'annonce importante pour le secteur public.

Encadré 1 : Données du GIS Sol et politiques publiques : l'exemple de la science ouverte

Box 1: *Soil data and public policies in GIS Sol: the Open Science perspective*

Dans le domaine de la recherche, le plan national pour la science ouverte (Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, 2021), ainsi que la circulaire n°6264/SG du 27 avril 2021 relative à la politique publique de la donnée, des algorithmes et des codes sources (Premier Ministre, 2021), enjoignent au secteur public et aux personnes morales concernées de permettre le partage de leurs données de recherche, selon le principe « *aussi ouvert que possible, aussi fermé que nécessaire* » (Philippe et al., 2022). Ce principe implique la prise en compte de paramètres tels que la nature des données (données protégées, par exemple des données à caractère personnel), le contexte de production des données, des impératifs de confidentialité entre partenaires de statuts différents (public/ privé) ou de protection de l'environnement.

En science ouverte, le partage des données est encadré par des procédures techniques et organisationnelles de gestion des données (« gouvernance des données »), pour faciliter leur accès, leur interopérabilité, leur réutilisation (principes « FAIR », Wilkinson et al., 2016), et diffuser les données de recherche dans des conditions de qualité optimales. Ce partage s'inscrit dans le respect des textes en vigueur, en particulier le code des relations entre le public et l'administration, le code de la recherche et le code de la propriété intellectuelle.

Les données personnelles

Au sens de la réglementation en vigueur, « *constitue une donnée à caractère personnel toute information relative à une personne physique identifiée ou qui peut être identifiée, directement ou indirectement, par référence à un numéro d'identification ou à un ou plusieurs éléments qui lui sont propres* ».

Sont ici en jeu des considérations de protection de la personne physique. Le traitement des données à caractère personnel est encadré strictement. Cette réglementation constitue un exemple d'exception au partage et à la diffusion des données, tant que la donnée n'a pas été remaniée pour ne plus être « à caractère personnel ». C'est le cas des données cadastrales, des coordonnées GPS qui permettent indirectement d'identifier une personne (CNIL, Chatellier, 2021). Ainsi, les coordonnées d'un site d'observation réalisé dans une propriété privée permettent indirectement d'identifier le propriétaire foncier et se trouvent donc considérées comme une donnée personnelle au sens du RGPD.

2. LES PROGRAMMES DU GIS SOL IMPLIQUENT DES ÉLÉMENTS DE NATURES MATÉRIELLE (ÉCHANTILLONS) ET IMMATÉRIELLE (DONNÉES)

En matière de collecte d'échantillons

L'enjeu est ici de s'assurer de la mise en œuvre de bonnes pratiques de prélèvement, surtout lorsque les opérations de collecte nécessitent de se rendre sur un terrain tiers. Des droits de propriété étant en jeu, il est conseillé de s'assurer de l'accord de l'exploitant ou du propriétaire du terrain concerné. La collecte et l'usage des échantillons de sol peuvent par ailleurs être régis par des dispositions conventionnelles ou réglementaires spécifiques, relatives par exemple à la protection de l'environnement (biodiversité notamment) et impliquant la mise en place de formalités de prélèvement ou de transfert de matériels dédiés.

En matière de données

Outre le fait que la collecte et l'usage des « données sol » mobilisent plusieurs régimes juridiques, ces opérations peuvent très facilement impliquer le recueil et le traitement de données personnelles (recueil de coordonnées GPS couplées avec une information personnelle).

L'intérêt légitime et l'exercice d'une mission d'intérêt public sont deux voies qui permettent, dans certains cas, de ne pas demander le consentement de la personne concernée. Cela n'exonère pas d'un devoir d'information de cette dernière, qui pourra exercer un droit d'opposition et d'effacement à tout moment. Cela n'exonère pas non plus les partenaires d'un projet de sécuriser le transfert des données, lesquelles doivent être pseudonymisées (CNIL, 2022 ; <https://www.cnil.fr/fr/recherche-scientifique-hors-sante/enjeux-avantages-anonymisation-pseudonymisation>).

Dans tous les cas, il est fortement recommandé de solliciter une expertise en matière de données personnelles auprès des délégué(e)s à la protection des données (« DPO »), pour les organismes qui en sont pourvus.

3. LES PROGRAMMES DU GIS SOL ONT UNE COMPOSANTE PARTENARIALE MULTI-ACTEURS FORTE

Les programmes du GIS Sol sont réalisés par ses membres, en partenariat avec d'autres acteurs. Ces partenariats sont formalisés par des contrats de collaboration entre partenaires

de statuts parfois différents. L'enjeu est ici qu'ils s'informent mutuellement de leurs droits et obligations respectifs (répartition des tâches, de la propriété, conditions d'usage des résultats obtenus), de s'accorder sur des périmètres de responsabilité (« qui fait quoi » pendant une durée déterminée).

Dans une situation où les partenaires de statuts différents (public, privé, associatif, participatif...) peuvent être concernés par des réglementations variées, une bonne pratique consiste à entreprendre d'identifier en amont les régimes juridiques applicables aux données mobilisées de part et d'autre (ainsi qu'aux bases de données qui les hébergent), voire aux résultats qui les intégreront. D'éventuelles restrictions pesant sur leur accès ou leur partage (confidentialité, données protégées...) peuvent par ailleurs se présenter.

De même, la présence de données à caractère personnel nécessite de prévoir la désignation d'un responsable de traitement de ces données et de sécuriser le transfert de ces données.

Le contrat est l'outil privilégié pour clarifier ces situations. En effet, il prévoit des engagements mutuels des parties sur les droits et obligations et clarifie les relations des partenaires en les organisant et en les sécurisant. À titre d'exemple, la refonte du contrat de mise à disposition de données qui lie les laboratoires d'analyse de sols et le GIS Sol dans le cadre de la BDAT a permis de clarifier la politique de restitution des données de la BDAT, pour tenir compte des intérêts des partenaires. La pérennité du programme est alors assurée grâce à la mise en place de modalités techniques et de gouvernance permettant de préserver les intérêts des partenaires.

En complément des dispositifs contractuels, la gouvernance des programmes du GIS Sol constitue un lieu d'information tout au long de la réalisation des projets. Par exemple, un « comité d'utilisateurs » a été mis en place au sein du programme de la BDAT pour permettre des échanges entre partenaires producteurs et utilisateurs.

4. LE « CYCLE DE VIE » DE LA DONNÉE

Avant de conclure cet article, nous proposons de donner ici quelques points de repère concernant l'approche de la gestion de la donnée sol par le « cycle de vie de la donnée » (Batifol *et al.*, 2021 ; CNRS, 2021).

Le plan de gestion de données (PGD) est à ce titre un outil structurant, en ce qu'il recense les étapes « amont » (collecte, dépôt) et « aval » (traitement, conservation, réutilisation) de la mobilisation des données. Outre le PGD, l'identification des enjeux juridiques associés à chaque étape est importante : existe-t-il une trace écrite des conditions de collecte des données ? Est-il possible d'identifier le propriétaire des données ? Le fournisseur a-t-il informé son partenaire des conditions d'utilisation ultérieure de ses données ? Des restrictions d'usage

ont-elles été signalées ? À son tour, le dépositaire, c'est-à-dire celui qui recueille des données tierces dans son système d'information, a-t-il pu informer son fournisseur des modalités de dépôt ? Autant de sujets qu'il est recommandé aux acteurs d'intégrer régulièrement à leurs relations partenariales.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le GIS Sol acquiert et utilise de nombreuses données. La nature des données et les cadres juridique ou partenarial applicables aux programmes du GIS Sol déterminent les modalités de diffusion et d'utilisation de ces données.

Outre la combinaison de plusieurs réglementations juridiques, la particularité des programmes du GIS Sol tient à leur composante partenariale forte, où nombreuses sont les données tierces issues du secteur privé. Un équilibre est à trouver entre l'accès, dit « ouvert », promu par les réglementations « open data » et environnementales et les droits des fournisseurs (données à caractère personnel, secret des affaires...).

Dans un contexte où les normes continuent par ailleurs d'évoluer, tant sur le plan national qu'europpéen (à titre d'exemple, voir l'adoption, en mai 2022, du Règlement UE 2022/868 sur la gouvernance européenne des données) (Union européenne, 2022) et où les sciences participatives prennent leur essor, le groupe de travail juridique du GIS Sol a entrepris de poursuivre le travail de clarification du statut juridique applicable aux données sol. Le plan d'action du groupe comprend l'étude de bases de données, de cas d'usage, de thématiques. Il étendra ses travaux à l'étude des spécificités d'autres programmes du GIS Sol : BDSolU (base de données des analyses de sols urbains) et BDETM (base de données d'analyse des éléments traces métalliques).

Au sein du GIS Sol et en dehors, la prise en compte du statut juridique des données sol se structure actuellement à plusieurs échelles.

En France :

- Les comités d'utilisateurs de données mis en place par le GIS Sol, tel que celui prévu pour la BDAT, permettent des échanges opérationnels multi-acteurs pour faciliter l'utilisation des données et prendre en compte les intérêts des partenaires. L'analyse sera étendue aux autres programmes du GIS Sol.
- La mise en place progressive des plans de gestion de données (PGD) et la sensibilisation à la FAIRisation des données peuvent faciliter les correspondances entre les étapes techniques et juridiques de traitement des données sol (*Encadré 1*).
- Les travaux du réseau national d'expertise scientifique et technique sur les sols (RNEST), tel que les « Recommandations méthodologiques pour le montage de projets collaboratifs sur les sols entre acteurs de la recherche et des territoires »

(Raous *et al.*, 2020) sont diffusés régulièrement et permettent de nourrir le dialogue entre acteurs de la donnée issus d'horizons différents.

En Europe :

- Le projet européen EJP SOIL (<https://ejpsoil.eu/>) a entrepris un travail commun (24 pays partenaires) d'analyse de l'implication de trois directives européennes sur le partage des données issues des sols agricoles. Ces directives sont les suivantes : la Directive 2003/4/CE du 28 janvier 2003 concernant l'accès du public à l'information en matière d'environnement ; la Directive 2007/2/CE du 14 mars 2007 établissant une infrastructure d'information géographique dans la Communauté européenne (INSPIRE) (Union européenne, 2007 et 2021) ; la Directive 2019/1024/CE du 20 juin 2019 concernant les données ouvertes et la réutilisation des informations du secteur public. Cette analyse a impliqué les membres du GIS Sol et a donné lieu à la production d'un rapport (Fantappiè *et al.*, 2021). Un contrat type de partage des données sol est à l'étude.
- La plateforme européenne EUSO (Observatoire des sols européens, [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eu-soil-](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eu-soil-observatory-euso_en)

[observatory-euso_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eu-soil-observatory-euso_en)) vise à devenir le principal fournisseur de données sur les sols en Europe. Son alimentation par les producteurs nationaux ou régionaux de données se pose notamment sur le plan juridique.

À l'échelle internationale :

- La FAO propose l'outil « SoiLEX » (FAO, 2021), décrit comme « *une base de données mondiale qui vise à faciliter l'accès aux informations sur les instruments juridiques existants en matière de protection des sols et de prévention de leur dégradation* ».
- Des initiatives internationales telles que le Global Soil Partnership et la réalisation de cartes mondiales (projet Global Soil Map, carte mondiale des stocks de carbone organique de la FAO, etc.) nécessitent également de clarifier les aspects d'accès et de diffusion des données sur les sols.

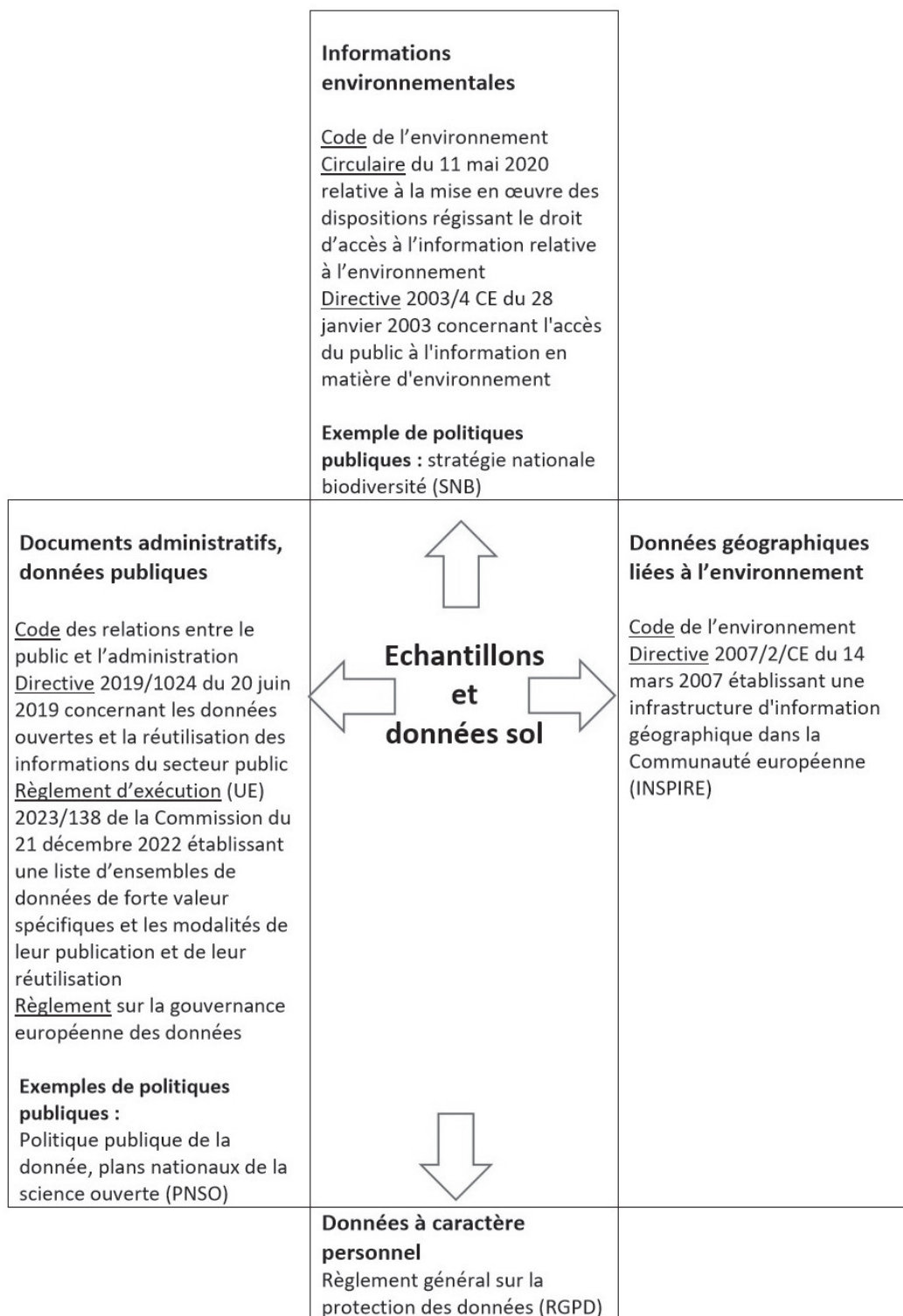
Tableau 2 : Mémo juridique pour les données du Gis Sol.

Table 2: *A legal memo for Gis Sol data.*

Régimes juridiques de référence	Données : - Données géographiques - Informations de nature environnementale - Données publiques - Données à caractère personnel Echantillons : - Droit de propriété (accès aux parcelles ...) - Conditions de prélèvement impliquant des réglementations ou des conventionnements spécifiques (biodiversité). Politiques publiques : - de la donnée, - de la science ouverte, - de la biodiversité...
Cycle de vie de la donnée	Etapes techniques et juridiques de la collecte au traitement et à la diffusion : https://doranum.fr/enjeux-benefices/le-cycle-de-vie-des-donnees-de-recherche_10_13143_gzj2-j593/ et https://hal.inrae.fr/hal-03204351/document
Collaboration entre acteurs	Information mutuelle, périmètre de responsabilités, propriété, conditions de réutilisation. Aide au montage (réseau RNEST-CSTI) : https://rnest.fr/wp-content/uploads/2020/11/Rapport_CSTI_GT-MobRechTerritoire_062020_VF.pdf
Points de vigilance	- Accès aux propriétés privées - Droits sur l'échantillon - Droit des données à caractère personnel - Impacts science ouverte, fiabilité et traçabilité technique sur le long terme : données FAIR - Droits des tiers sur les produits issus des données - Responsabilité

Figure 1 : Quelques repères juridique et politique applicables à l'accès aux données du GIS Sol (par souci de simplification, ce tableau indique les principaux blocs juridiques, aujourd'hui codifiés).

Figure 1: An overview of legal and policy frameworks to access to GIS Sol data.



REMERCIEMENTS

À Dominique Guyonnet (BRGM), Jean-François Brunet (BRGM), Joëlle Sauter (Chambre d'agriculture Grand Est), pour leur contribution au groupe de travail juridique du GIS Sol.
À Nathalie Gandon, Déléguée à la protection des données personnelles d'INRAE.

BIBLIOGRAPHIE

- Assemblée Nationale, Commission des Lois constitutionnelles, de la législation et de l'administration générale de la République (2022). Questionnaire à l'attention de M. Bruno Lasserre. <https://www2.assemblee-nationale.fr/content/download/481245/4684995/file/R%C3%A9ponses%20de%20Bruno%20Lasserre%20au%20questionnaire%20.pdf>
- Batifol V., Burnel L., Cardona A., Johany F. (2021). Affiche « Cycle de vie des données : un outil pour améliorer la gestion, la mise en qualité et l'ouverture des données ». <https://hal.inrae.fr/hal-03204351/document>
- Code de l'environnement.
- Code des relations entre le public et l'administration (CRPA).
- Code de la recherche.
- Code de la propriété intellectuelle.
- Code pénal.
- CADA, CNIL (2019). Guide pratique de la publication en ligne et de la réutilisation des données publiques. https://www.cada.fr/sites/default/files/guide_pratique.pdf
- CNIL (2022). Recherche scientifique (hors santé) : enjeux et avantages de l'anonymisation et de la pseudonymisation. <https://www.cnil.fr/fr/recherche-scientifique-hors-sante/enjeux-avantages-anonymisation-pseudonymisation>
- CNIL, Chatellier R. (2021). Environnement : des données, des capteurs et des captés. <https://linc.cnil.fr/fr/environnement-des-donnees-des-capteurs-et-des-captés>
- CNRS (2021). Le cycle de vie des données de recherche. DOI : 10.13143/gzj2-j593. https://doranum.fr/enjeux-benefices/le-cycle-de-vie-des-donnees-de-recherche_10_13143_gzj2-j593/
- Commission européenne (2021). Consultation concernant l'évaluation de la directive INSPIRE. Rapport de la consultation. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12427-Partage-de-donnees-geospatiales-sur-lenvironnement-Evaluation-directive-INSPIRE-/F_fr
- Fantappiè M., Peruginelli G., Conti S., Rennes S., van Egmond F., Le Bas C. (2021). Report on the national and EU regulations on agricultural soil data sharing and national monitoring activities. https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_D6.2_Report_on_national_and_EU_regulations_on_agricultural_soil_data_sharing.pdf
- FAO (2021). SoiLEX - Instruments juridiques relatifs aux sols et gouvernance des sols. <https://www.fao.org/soils-portal/soilex/fr/> (dernier accès le 15 septembre 2022)
- Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche (2021). Plan national pour la science ouverte 2021-2024. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/le-plan-national-pour-la-science-ouverte-2021-2024-vers-une-generalisation-de-la-science-ouverte-en-48525>
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2020). Circulaire ministérielle du 11 mai 2020 relative à la mise en œuvre des dispositions régissant le droit d'accès à l'information relative à l'environnement. <https://www.legifrance.gouv.fr/circulaire/id/44969>
- Philippe O., Rennes S., Szabo D., Martel A.S. (2022). Ouverture des données : ... aussi ouvert que possible ... Aussi fermé que nécessaire. (10.17180/991x-t610). (hal-03659484)
- Premier Ministre (2021). Circulaire n°6264/SG du 27 avril 2021 relative à la politique publique de la donnée, des algorithmes et des codes sources. <https://www.legifrance.gouv.fr/circulaire/id/45162>
- Raous S., King C., Alleto L., Bougon N., Chenu C., Cortet J., Derrien D., Dictor M.C., François Y., Keller C., Perrin, A.S., Pousse N., Remy E., Rennes S., Servain F. (2020). Recommandations méthodologiques pour le montage de projets collaboratifs sur les sols entre acteurs de la recherche et des territoires ». https://rnest.fr/wp-content/uploads/2020/11/Rapport_CSTI_GT-MobRechTerritoire_062020_VF.pdf
- Union européenne (2007). Directive 2007/2/CE du Parlement européen et du Conseil du 14 mars 2007 établissant une infrastructure d'information géographique dans la Communauté européenne (INSPIRE). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0002&from=FR>
- Union européenne (2022). Règlement (UE) 2022/868 du Parlement Européen et du Conseil du 30 mai 2022 portant sur la gouvernance européenne des données et modifiant le règlement (UE) 2018/1724 (règlement sur la gouvernance des données). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R0868&from=EN>
- Wilkinson M.D., Dumontier M., Jan Aalbersberg I., Appleton G., Axton M., Baak A., Blomberg N., Boiten J.W., da Silva Santos L.B., Bourne P.E., Bouwman J., Brookes A.J., Clark T., Crosas M., Dillo I., Dumon O., Edmunds S., Evelo C.T., Finkers R., Gonzalez-Beltran A., Gray A.J.G., Groth P., Goble C., Grethe J.S., Heringa J., Hoen P.A.C., Hooft R., Kuhn T., Kok R., Kok J., Lusher S.J., Martone M.E., Mons A., Packer A.L., Persson B., Rocca-Serra P., Roos M., van Schaik R., Sansone S.A., Schultes E., Sengstag T., Slater T., Strawn G., Swertz M.A., Thompson M., van der Lei J., van Mulligen E., Jan Velterop, Waagmeester A., Wittenburg P., Wolstencroft K., Zhao J., Mons B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Sci Data*, doi: 10.1038/sdata.2016.1 <https://www.nature.com/articles/sdata201618>

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

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

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

RÉSUMÉ

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

Comment citer cet article :

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

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

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

surveillance des sols. Enfin, nous illustrons l'implication du GIS Sol au niveau des politiques et des rapports européens et mondiaux sur les sols et des actions de normalisation internationales.

Ces illustrations indiquent clairement que ses programmes pionniers, originaux, inspirants et complémentaires, ont pesé fortement sur le rayonnement du GIS Sol à l'international.

Mots-clés

Sols, GIS Sol, France, rayonnement international, rapportage

SUMMARY

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

Soils are at the crossroads of major planetary issues. The importance of rational and sustainable soil management is thus increasingly recognized worldwide. It is logically the same with regard to the need to establish harmonized local, national, continental and global information systems on soils and their properties. In this article, we describe the international developments for which we consider that the GIS Sol has played an important role for the development of demonstration products, and in terms of collaboration, initiation, training, or for the coordination of international actions.

In this article, we first illustrate how the actions of GIS Sol and its partners have contributed to the development of information systems and support for foreign, European or global infrastructures. We then show its most significant actions in terms of developing and structuring research and strengthening France's scientific leadership in databases, mapping and soil monitoring. Finally, we illustrate the involvement of GIS Sol in European and global policies and reporting on soils and international standardization actions.

These illustrations clearly indicate that its pioneering, original, inspiring and complementary programs, have had a strong impact on the influence of the GIS Sol internationally.

Key-words

Soils, GIS Sol, France, international influence, reporting.

RESUMEN

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

Los suelos se encuentran en una encrucijada de importantes desafíos mundiales. En consecuencia, se reconoce cada vez más la importancia de una ordenación racional y sostenible de los suelos. Lo mismo se aplica lógicamente a la necesidad de crear sistemas de información armonizados, locales, nacionales, continentales y mundiales sobre los suelos y sus propiedades. En este artículo, describimos las evoluciones internacionales en las que consideramos que el GIS Sol desempeñó un papel importante, tanto en el desarrollo de productos de demostración, como en materia de colaboración, iniciación, formación, o de coordinación de acciones internacionales.

En este artículo, ilustramos en primer lugar cómo las acciones del GIS Sol y de sus asociados han contribuido al desarrollo de sistemas de información y al apoyo a infraestructuras extranjeras, euro-peas o mundiales. Luego mostramos sus acciones más destacadas en materia de desarrollo y estructuración de la investigación y del fortalecimiento del liderazgo científico de Francia en bases de datos, cartografía y vigilancia de los suelos. Por último, ilustramos la implicación del GIS Sol en las políticas e comunicaciones europeas y mundiales sobre los suelos y en las acciones de normalización internacionales.

Estas ilustraciones indican claramente que sus programas pioneros, originales, inspiradores y complementarios han influido fuertemente en la proyección internacional del GIS Sol.

Palabras clave

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

INTRODUCTION

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sans en faire une liste exhaustive, les données acquises par le GIS Sol, comme les échantillons collectés au conservatoire d'échantillons de sols (Ratié *et al.*, 2010), ont permis l'établissement de très nombreuses collaborations de recherche et la production de très nombreux articles internationaux. Ceci a résulté en une visibilité accrue des équipes nationales

en science du sol, une présence française renforcée dans les comités éditoriaux de revues internationales, et dans l'édition de plusieurs numéros spéciaux dans ces revues.

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

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

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

Le réseau européen ICOS (International Carbon Observation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Approbation des spécifications de *GlobalSoilMap* par le GSP.

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

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

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

DISCUSSION

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les succès et la reconnaissance attirent les sollicitations. Certains partenaires du GIS Sol ont pu être de plus en plus sollicités et impliqués dans des programmes bilatéraux, européens, des comités d'organisations mondiales (Union Internationale des Sciences du Sol, GSP-FAO des Nations Unies, ISO). Cette montée internationale a pu être perçue comme une contrainte, « détournant » une partie du temps des personnels vers des activités dépassant les objectifs stricts du GIS Sol, retardant ainsi la mise en place du système d'information sur les sols de France. Inversement, elle a offert l'opportunité de démultiplier les efforts et de mieux valoriser les données du GIS Sol, tant au plan français, qu'international. Aujourd'hui, les enjeux sur les sols sont mondiaux, et ne pas prendre en compte

les effets sur d'autres pays de la gestion française des sols et des filières agricoles serait une erreur. Il en est de même des transferts de contaminants ou de sédiments entre pays via les pollutions d'origine atmosphériques, ou les transports via l'érosion et les grands fleuves. La recherche est elle-même mondialisée, et le rayonnement du GIS Sol permet de nouer des collaborations avec de nouveaux spécialistes, de favoriser son impact multidisciplinaire, de renforcer son attractivité en attirant de nouveaux talents (doctorants, post-doctorants, visiteurs étrangers). Cette attractivité du GIS Sol est d'une importance considérable, car elle permet de mieux valoriser toutes ses données, de tester des méthodes innovantes d'analyses de sol ou de traitement des données. Les retombées sont positives, tant pour une meilleure connaissance et gestion des sols de France, que pour la production de connaissances et d'innovations génériques sur les plans scientifique et technologique.

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

CONCLUSIONS

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

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

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

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

REMERCIEMENTS

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

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

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

BIBLIOGRAPHIE

- Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W., Olson C., Sztein A.E., Sparks D.L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science* 348, 1261071. <https://doi.org/10.1126/science.1261071>
- Antoni V., Le Bissonnais Y., Thorette J., Zaidi N., Laroche B., Barthès S., Daroussin J., Arrouays D. (2006). Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250.000 et confrontation aux enjeux locaux. *Etude et Gestion des Sols*, 13(3), 201-222.
- Antoni V., Soubelet H., Rayé G., Eglin T., Bispo A., Feix I., Slak M.F., Thorette J., Fort J.-L., Sauter J. (2019). Contribution of knowledge advances in soil science to meet the needs of French state and society. In: *Global Soil Security: Towards More Science-Society Interfaces: Proceedings of the Global Soil Security 2016 Conference, December 5-6, 2016, Paris, France. 1st Edition*. Eds: Anne Richer-de-Forges A.C., Carré F., McBratney A.B., Bouma J., Arrouays, D. Taylor & Francis, London, pp. 33-42.
- Arribas P., Andujar C., Bidartondo M.I., Bohmann K., Coissac E., Creer S., deWaard J.R., Elbrecht Vasco., Ficetola G.F., Goberna M., Kennedy S., Krehenwinkel H., Leese F., Novotny V., Ronquist F., Yu D.W., Zinger L., Creedy T.J., Meramveliotakis E., Nogueras V., Overcast Isaac., Morlon H., Vogler A.P., Papadopolou A., Emerson B.C. (2021). Connecting high-throughput biodiversity inventories: Opportunities for a site-based genomic framework for global integration and synthesis. *Molecular Ecology*, 30(5), 1120-1135. DOI: 10.1111/mec.15797.
- Arrouays D., Dawson L. (2022). Soil Priorities around the World - An introduction. *Geoderma Regional*, 30, e00555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00555>.
- Arrouays D., Grundy M.G., Hartemink A.E., Hempel J.W., Heuvelink G.B.M., Hong S.Y., Lagacherie P., Lelyk G., McBratney A.B., McKenzie N.J., Mendonça-Santos M.d.L., Minasny B., Montanarella L., Odeh I.O.A., Sanchez P.A., Thompson J.A., Zhang G.-L. (2014). GlobalSoilMap: towards a fine-resolution global grid of soil properties. *Advances in Agronomy*, 125, 93-134. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800137-0.00003-0>.
- Arrouays D., Lagacherie P., Hartemink A. (2017a). Digital soil mapping across the globe. *Geoderma Regional*, 9, 1-4.
- Arrouays D., Leenaars J., Richer-de-Forges A.C., Adhikari K., Ballabio C., Greve M., Grundy M., Guerrero E., Hempel J., Hengl T., Heuvelink G., Batjes N., Carvalho E., Hartemink A., Hewitt A., Hong S.-Y., Krasilnikov P., Lagacherie P., Lelyk G., Libohova Z., Lilly A., McBratney A., McKenzie N., Vasques G., Mulder V.L., Minasny B., Montanarella L., Odeh I., Padarian J., Poggio L., Roudier P., Saby N., Savin I., Searle R., Stolbovoy V., Thompson J., Smith S., Sulaeman Y., Vintila R., Viscarra Rossel R., Wilson P., Zhang G.-L., Swerts M., van Oorts K., Karklins A., Feng L., Ibelle Navarro A.R., Levin A., Laktionova T., Dell'Acqua M., Suvannang N., Ruam W., Prasad J., Patil N., Husnjak S., Pásztor L., Okx J., Hallet S., Keay C., Farewell T., Lilja H., Juilleret J., Marx S., Takata Y., Kayusuki Y., Mansuy N., Panagos P., van Liedekerke M., Skalsky R., Sobocka J., Kobza J., Eftekhari K., Kazem Alavipanah S., Moussadek R., Badraoui M., da Silva M., Paterson G., da Conceição Gonçalves M., Theocharopoulos S., Yemefack M., Tedou S., Vrscaj B., Grob U., Kozak J., Boruvka L., Dobos E., Taboada M., Moretti L., Rodriguez D. (2017b). Soil legacy data rescue via GlobalSoilMap and other international and national initiatives. *GeoRes J*, 14, 1-19.
- Arrouays D., Morvan X.P.P., Saby N.P.A., Richer-de-Forges A.C., Le Bas C., Bellamy P.H., Berényi Üveges J., Freudenthuß A., Jones A.R., Jones R.J.A., Kibblewhite M.G., Simota C., Verdoodt A., Verheijen F.G.A. (eds) (2008). *Environmental Assessment of Soil for Monitoring: Volume IIa Inventory & Monitoring*. EUR 23490 EN/2A, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 188 pp.
- Arrouays D., Mulder V.L., Richer-de-Forges A.C. (2021a). Soil mapping, digital soil mapping and soil monitoring over large areas and the dimensions of soil security - A review. *Soil Security*, 5, 100018.
- Arrouays D., Saby N.P.A., Boukir H., Jolivet C., Ratié C., Schrumpp M., Merbold L., Gielen B., Gogo S., Delpierre N., Vincent G., Klumpp K., Loustau D. (2018a). Soil sampling and preparation for monitoring soil carbon. *International Agrophysics*, 32, 633-643. doi:10.1515/intag-2017-0047.
- Arrouays D., Savin I.Y., Leenaars J.G.B., McBratney A.B. (eds). (2018b). *GlobalSoilMap. Digital soil mapping from country to globe*. Taylor&Francis CRC Press, London. 174 p.
- Arrouays D., McBratney A.B., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A.C., Morgan C., Roudier P., Poggio L., Mulder V.L. (2020a). Impressions of digital soil maps: the good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional*. 20, e00255. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>
- Arrouays D., Poggio L., Mulder V.L., Salazar Guerrero O. (2021b). Digital soil mapping and GlobalSoilMap- Scientific advances and the operational use of digital soil mapping to address global environmental challenges. *Geoderma Regional* 26, e00414. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00414>
- Arrouays D., Poggio L., Salazar Guerrero O.A., Mulder V.L. (2020b). Digital soil mapping and GlobalSoilMap. Main advances and ways forward. *Geoderma Regional* 21, e00265. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00265>
- Arrouays D., Stengel P., Feix I., Lesaffre B., Morard V., Bardy M., Bispo A., Laroche B., Caquet T., Juille F., Rabut M., Soussana J.-F., Voltz M., Gascuel-Oudoux C. (2022). Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années. *Etude et Gestion des Sols*, 29, 365-379.

- Arrouays D., Vion I., Kicin J.-L. (1995). Spatial analysis and modeling of topsoil carbon storage in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Science*, 159, 191 - 198.
- Baruth B., Genovese G., Montanarella L. (eds.) (2006). New soil information for the MARS Crop Yield Forecasting System. European Commission, Joint Research Centre (DG JRC), Institute for the Protection and Security of the Citizen (IPSC), Ispra, Italie, 108 pages.
- Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W. (1992). Calibration and validation of a soil-landscape model for predicting soil drainage class. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1860-1866.
- Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W. (1994). Soil drainage probability mapping using a soil - landscape model. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 464 - 470
- Berthier L., Bardy M., Chenu J.-P., Guzmova L., Laroche B., Lehmann S., Lemerrier B., Martin M.P., Mérot P., Squidant H. (2014). Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine - notice d'accompagnement. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France. Ministère d'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.
- Bispo A., Andersen L., Angers D., Bernoux M., Brossard M., Cécillon L., Comans R., Harmsen J., Jonassen K., Lamé F., Lhuillery C., Maly S., Martin E., McElnea A., Sakai H., Watabe Y., Eglén T. (2017). Accounting for carbon stocks in soils and measuring emissions fluxes of GHGs from soils: do we have the necessary standards? *Frontiers in Environmental Science*, section Soil Processes, July 2017/Vol. 5 / Article 41; doi: 10.3389/fevs.2017.00041
- Bispo A., Arrouays D., Saby N.P.A., Boulonne L., Fantappiè M. (2021). Proposal of methodological development for the LUCAS programme in accordance with national monitoring programmes. EJP SOIL - Deliverable 6.3. https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_Deliverable_6.3_Dec_2021_final.pdf
- Bispo A., Le Bas C. (2021). Is there a role of EU national soil data organizations in contributing to EUSO? The French example. EUSO Stakeholders Forum, Joint Research Centre, Oct 2021, Conférence virtuelle, Italy.
- Bispo A., Fantappiè M., van Egmond F., Smreczak B., Bakacsi Z., Hessel R., Wetterlind J., Siebelec G., Jones A. (2022). A review of existing soil monitoring systems to pave the way for the EU Soil Observatory. World Congress of Soil Science, 1-5 août 2022, Glasgow, Royaume Uni.
- Bispo A., *et al.*, (à paraître). Les différents programmes du GIS Sol: qu'avons-nous fait de nos 20 ans ? Etude et Gestion des Sols, numéro spécial « 20 ans du GIS sol ».
- Bispo A., Guellier C., Martin E., Sapjanskas J., Soubelet H., Chenu C. (eds.) (2016). Les sols. Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable. Collection Savoir-faire. Editions Quae, France. 304 p.
- Bouma J. (2014). Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(2), 111-120.
- Bouma J. (2020). Soil security as a roadmap focusing soil contributions on sustainable development agendas. *Soil Security* 1, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2020.100001>.
- Bui E.N., Loughhead A., Corner R. (1999). Extracting soil - land-landscape rules from previous soil surveys. *Australian Journal of Soil Research*, 37, 495 - 508
- Caubet M., Román Dobarco M., Arrouays D., Minasny B., Saby N.P.A. (2019). Merging country, continental and global predictions of soil texture: Lessons from ensemble modelling in France. *Geoderma*, 337, 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.007>
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., King C., Antoni V., Surdyk N., Dubus I., Arrouays D., Desprats J.F. (2006). Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°3: Synthèse et recommandations générales. BRGM/RP-55104-FR, p. 87.
- Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y., Van Oost K., Poesen J., Saby N.P.A., Gobin A., Vacca A., Quinton J.L., Auerswald K., Klik A., Kwaad F.J.P.M., Raclot D., Ionita I., Rejman J., Rousseva S., Muxart T., Roxo M.J., Dostal T. (2010). Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology*, 122, (1/2), 167-177.
- Chen S., Mulder V.L., Heuvelink G.B.M., Poggio L., Caubet M., Román Dobarco M., Walter C., Arrouays D. (2020). Model averaging for mapping topsoil organic carbon in France. *Geoderma* 366, 114237. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114237>
- Chen S., Xu H., Dongyun D., Ji W., Li S., Yang M., Hu B., Zhou Y., Wang N., Arrouays D., Shi Z. (2021). Evaluating validation strategies on the performance of soil property prediction from regional to continental spectral data. *Geoderma*, 400, 115159. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115159>.
- Chen S., Arrouays D., Mulder V.-L., Poggio L., Minasny B., Roudier P., Libohova Z., Lagacherie P., Shi Z., Hannam J., Meersmans J., Richer-de-Forges A.C., Walter C. 2022. Digital mapping of *GlobalSoilMap* soil properties at a broad-scale: A review. *Geoderma*, 409, 115567.
- Citeau L., Bispo A., Bardy M., King D. (eds) (2008). Gestion durable des sols. Collection : Savoir-faire. Editions Quae, France. 336 p.
- CITEPA, 2022. Rapport OMINEA - 19ème édition. 1079 pages. <https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/ominea/OMINEA-2022v2.pdf>.
- Commission Européenne. (2006). Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE. COM(2006) 232 final. 31p. Version française disponible sur : https://www.senat.fr/europe/textes_europeens/e3251.pdf (consulté le 30/09/2022).
- De Bruin S., Stein A. (1998). Soil - Landscape modeling using fuzzy c-means clustering of attribute data derived from a Digital Elevation Model (DEM). *Geoderma*, 83, 17 - 33.
- Daroussin J., King D., Le Bas C., Vrscaj B., Dobos E., Montanarella L. (2006). Chapter 4: The Soil Geographical DataBase of Eurasia at scale 1:1,000,000: history and perspective in Digital Soil Mapping. *Developments in soil science*, 31, 55-65.
- Daroussin J., Cousin I., Tibi A., Le Bissonnais Y., Girardin A., Meillet A., Choler P., Therond O. (2019). Evaluating the "Soil stabilisation and control of erosion" ecosystem service provided by agricultural ecosystems over the French territory. *Global Symposium on Soil Erosion*, May 2019, Rome, Italy. pp. 93-97.
- Dequiedt S., Thioulouse J., Jolivet C., Saby N.P.A., Lelievre M., Maron P.A., Martin M.P., Chemidlin-Prévost-Bouré N., Arrouays D., Lemanceau P., Ranjard L. (2009). Biogeographical Patterns of Soil Bacterial Communities. *Environ. Microbiol. Reports*, 1(4), 251-254.
- Dewitte O., Jones A., Spaargaren O., Breuning-Madsen H., Brossard M., Dampha, A., Deckers J., Gallali T., Hallett S., Jones R.J.A., Kilasara M., Le Roux P., Micheli E., Montanarella L., Thiombiano L., Van Ranst E., Yemefack M., Zougmore R. (2013). Harmonisation of the soil map of Africa at the continental scale. *Geoderma*, 211, 138-153. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.07.007.
- Dharumarajan S., Hedge R., Singh J.S.K. (2019). The need for digital soil mapping in India. *Geoderma Regional*, 16, e00204. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00204>.
- Dunning A., de Smaele M., Böhmer V. (2017). Are the FAIR Data Principles Fair? *International Journal of Digital Curation*, 12(2), 177-195. DOI: 10.2218/ijdc.v12i2.567.
- Eckelmann W., Baritz R., Bialousz S., Bielek P., Carré F., Houšková B., Jones R.J.A., Kibblewhite M.G., Kozak J., Le Bas C., Tóth G., Tóth T., Várallyay G., Yli Halla M., Zupan M. (2006). Common Criteria for Risk Area Identification according to Soil Threats. European Soil Bureau Research Report No.20, EUR 22185 EN, 94 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- EEA. (2010). The European environment — state and outlook: Thematic assessment — Soil, 2010. 48 p. [online : https://www.eea.europa.eu/soer/europe/soil/at_download/file]

- EEA. (2019). EEA Signals: Land and soil in Europe. 60 pages [online: <https://www.eea.europa.eu/publications/eea-signals-2019-land>]
- EEA. (2020). SOER 2020, Chapter 5 Land and soil. [online: <https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020/#page=113>]
- EEA. (2022, *sous presse*). Soil monitoring in Europe Indicators and thresholds for soil health assessments.
- Eliasson A., Jones R.J.A., Nachtergaele F., Rossiter D.G., Terres J.-M., Van Orshoven J., van Velthuizen H., Böttcher K., Hastrup P., Le Bas C. (2010). Common criteria for the redefinition of Intermediate Less Favoured Areas in the European Union. *Environmental Science and Policy*, 13, 766-777.
- ESBN. (2005a). Soil Atlas of Europe. European Commission, 128 pp, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- ESBN. (2005b). Soil Resources of Europe, second edition. R.J.A. Jones, B. Houšková, P. Bullock and L. Montanarella (eds). European Soil Bureau Research Report No.9, EUR 20559 EN, (2005), 420pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- European Commission. (2016). Guidelines on FAIR data management in Horizon 2020 (3rd ed.). European Commission - Directorate-General for Research and Innovation. Retrieved from: http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/grants_manual/hi/oa_pilot/h2020-hi-oa-data-mgt_en.pdf
- European Commission. (2021). COM (2021) 699 final - Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. EU Soil Strategy for 2030. Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699>.
- Franz D., Acosta M., Altirir N., Arriga N., Aubinet M., Aurela M., Arrouays D., Edward Ayres E., López-Ballesteros A., Barbaste M., Berveiller D., Boukir H., Brown T., Brümmer C., Buchmann N., Burba G., Carrara A., Cescatti A., Ceschia E., Clement R., Cremonese E., Crill P., Dařenová E., Dengel S., D'Odorico P., Fleck S., Frattini G., Fuß R., Gielen B., Gogo S., Grace J., Graf A., Gross P., Grünwald T., Haapanala S., Hehn M., Heinesch B., Heiskanen J., Herbst M., Hörtnagl L., Ibrom A., Jolivet C., Joly L., Jones M., Kiese R., Klemedtsson L., Kljun N., Klumpp K., Kolari P., Kolle O., Kowalski A., Kutsch W., Laurila T., de Ligne A., Linder S., Lindroth A., Lohila A., Longdoz B., Mammarella I., Manise T., Marañón Jiménez S., Matteucci G., Matthias M., McDermitt D.K., Meier P., Merbold L., Mereu S., Metzger C., Metzger S., Migliavacca M., Mölder M., Montagnani L., Moureaux C., Nelson D., Nemitz E., Giacomo G., Nilsson M.B., Op de Beeck M., Osborne B., Ottosson Löfvenius M., Pavelka M., Peichl M., Peltola O., Pihlatie M., Pitacco A., Pokorny R., Pumpanen J., Ratié C., Rebmann C., Roland M., Simone Sabbatini S., Saby N.P.A., Saunders M., Schmid H.P., Schrupf M., Sedláč P., Serrano Ortiz P., Siebicke L., Šigut L., Silvennoinen H., Simioni G., Skiba U., Sonntag O., Soulé P., Steinbrecher R., Tallec T., Thimonier A., Tuittila E.-S., Tuovinen J.-P., Vestin P., Vincke C., Vitale D., Waldner P., Weslien P., Wingate L., Wohlfahrt G., Zahniser M., Vesala T. (2018). Towards long-term standardised carbon and greenhouse gas observations for monitoring Europe's terrestrial ecosystems. *International Agrophysics*, 32, 439-455. doi: 10.1515/intag-2017-0039.
- Giller K.E. (2012). No silver bullets for African soil problems. *Nature* 485, 41-41. <https://doi.org/10.1038/485041c>.
- Grinand C., Arrouays D., Laroche B., Martin M.P. (2008). Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. *Geoderma*, 143, 180-190.
- Grinand C., Rajanarivo A., Bernoux M., Pajot V., Brossard M., Razafimbelo T., Albrecht A., Le Martret H. (2009). Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Étude et Gestion des Sols*, 16, 1, 23-33.
- Guevara M., Olmedo G.F., Stell E., Yigini Y., Aguilar Duarte Y., Arellano Hernández C., Arévalo G.E., Arroyo-Cruz C.E., Bolívar A., Bunning S., Bustamante Cañas N., Cruz-Gaistardo C.O., Davila F., Dell Acqua M., Encina A., Figueredo Tacona H., Fontes F., Hernández Herrera J.A., Ibelle Navarro A.R., Loayza V., Manueles A.M., Mendoza Jara F., Olivera C., Osorio Hermosilla R., Pereira G., Prieto P., Alexis Ramos I., Rey Brina J.C., Rivera R., Rodríguez-Rodríguez J., Roopnarine R., Rosales Ibarra A., Rosales Riveiro K.A., Schulz G.A., Spence A., Vasques G.M., Vargas R.R., Vargas R. (2018). No Silver Bullet for Digital Soil Mapping: Country-specific Soil Organic Carbon Estimates across Latin America (preprint). *Soil and methods*. <https://doi.org/10.5194/soil-2017-40>
- Hartemink A.E., McBratney A.B. (2008). A soil science renaissance. *Geoderma* 148, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.10.006>
- Hessel R., Daroussin J., Verzandvoort S., Walvoort D. (2014). Evaluation of two different soil databases to assess soil erosion sensitivity with MESALES for three areas in Europe and Morocco. *Catena*, 118, 234-247.
- INSPIRE Thematic Working Group Soil. (2013). D2.8.III.3 INSPIRE Data Specification on Soil - Draft Guidelines. European Commission Joint Research Centre. 319 pages.
- ISO. (2007). ISO 18512:2007. Soil quality — Guidance on long- and short-term storage of soil samples.
- ISO. (2015). ISO 11074, 2015. Soil quality — Vocabulary.
- ISO. (2018). ISO 16133:2018. Soil quality — Guidance on the establishment and maintenance of monitoring programmes.
- ISO. (2013-2019). ISO 28258:2013/A1:2019. Soil quality - Digital exchange of soil-related data - Amendment 1 (ISO 28258:2013/Amd 1:2019).
- ISO. (2019). ISO 25177:2019. Soil quality — Field soil description.
- ISO. (2021). ISO 23400. 2021. Soil quality. Guidelines for the determination of organic carbon and nitrogen stocks and their variations in mineral soils at field scale.
- ITPS-FAO (2015). Charte mondiale des sols révisée. FAO. Organisation Mondiale des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome. Version française. 7 p. <https://www.fao.org/3/I4965F/I4965f.pdf> (consulté le 30/09/2022)
- Jamagne M., King D., Le Bas C., Daroussin J. (1995). Development and application of a European soil geographic database. *Eurasian Soil Science*, 27(4), 19-23.
- Karimi B., Terrat S., Dequiedt S., Saby N.P.A., Horrigue W., Lelièvre M., Nowak V., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Bispo A., Maron P.-A., Chemidlin-Prévoist Bouré N., Ranjard L. (2018). Spatial distribution and environmental drivers of soil bacterial and archaea phyla across France. *Science Advances*, 4, 7, eaat 1808.
- Keesstra S.D., Bouma J., Wallinga J., Tittonell P., Smith P., Cerdà A., Montanarella L., Quinton J.N., Pachepsky Y., van der Putten W.H., Bardgett R.D., Moolenaar S., Mol G., Jansen B., Fresco L.O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2(2), 111-128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>
- 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. (1992). Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris comme référence. PhD thesis, Université Montpellier II, France.
- Lagacherie P., Depraetere C. (1991). Analyse des relations sol-paysage au sein d'un secteur de référence en vue d'un zonage pédologique semi-automatisé d'une petite région naturelle. In: Riou, C. (Ed.), *Le Zonage Agropédologique*. Séminaire Paris, 23 et 24 Mars 1989, pp. 116-138.
- Lagacherie P., Legros J.P., Burrough P.A. (1995). A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. *Geoderma*, 65, 283 -301.
- Lagacherie P., Holmes S. (1997). Addressing geographical data errors in a classification tree soil unit prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 183 - 198.
- Lagacherie P., McBratney A.B., Voltz M. (Eds), (2007). *Digital Soil Mapping - An Introductory perspective*. Elsevier, Amsterdam. 658 p.

- Lal R., Bouma J., Brevik E., Dawson L., Field D.J., Glaser B., Hatano R., Hartemink A.E., Kosaki T., Lascelles B., Monger C., Muggler C., Ndzana G.M., Norra S., Pan X., Paradelo R., Reyes-Sánchez L.B., Sandén T., Singh B.R., Spiegel H., Yanai J., Zhang J. (2021). Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. *Geoderma Regional*, 25, e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
- Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J., King D. (1998). Cartographie de l'aléa "Erosion des sols" en France. Ifen, Collection Etudes et Travaux n° 18, Août 1998. 77 pages.
- Le Bissonnais Y., Daroussin J., Jamagne M., Lambert J.J., Le Bas C., King D., Cerdan O., Léonard J., Bresson L.M., Jones R. (2005). Pan-European soil crusting and erodibility assessment from the European Soil Geographical Database Using pedotransfer rules. *Advances in Environmental Modelling and Monitoring*, 2, 1-15.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King D. (2002). Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46, 207-220.
- Legros J.P., Bonneric P. (1979). Modélisation informatique de la répartition des sols dans le Parc Régional Naturel du Pilat. *Ann. Univ. Savoie*. 63-68.
- Lemercier B., Lagacherie P., Amelin J., Sauter J., Pichelin P., Richer-de-Forges A.C., Arrouays D. (2022). Multiscale evaluations of global, national and regional digital soil mapping products in France. *Geoderma*, 425, 116052. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116052>
- Leenaars J.G.B., Kempen B., van Oostrum A.J.M., Batjes N.H. (2014). Africa soil profiles database: a compilation of georeferenced and standardised legacy soil profile data for Sub-Saharan Africa. In: Arrouays D., McKenzie N.J., Hempel J.W., Richer-de-Forges A.C., McBratney A.B., (editors). *GlobalSoilMap: basis of the global soil information system*. Oxon: Taylor & Francis, CRC press; pp. 51-57.
- Loi Climat et résilience. (2021). Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021, portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>
- Loubet B., Saby N.P.A., Lafont S., Gebleh M., Jolivet C., Ratié C., Chenu J.-P., Proix N. (2021). Soil sampling protocol and analysis by the ICOS ecosystem thematic center (ETC). *The ICOS France Science day 2021*. Understanding the greenhouse gases cycle in a warming Earth. Université de Reims, France, 12th-14th Oct. 2021.
- Loustau D., Jolivet C., Lafont S., Loubet B., Klumpp K., Papale D., Arrouays D. (2017). ICOS Ecosystem Instructions for Soil Samples Collection and Preparation (Version 20201020). ICOS Ecosystem Thematic Centre. <https://doi.org/10.18160/k3yc-td6h>
- Maréchal A., Jones A., Panagos P., Belitrandi D., De Medici D., De Rosa D., Martin Jimenez J., Koeninger J., Labouyrie M., Liakos L., Lugato E., Matthews F., Montanarella L., Muntwyler A., Orgiazzi A., Scarpa S., Schillaci C., Wojda P., Van Liedekerke M., Simoes Vieira D. (2022). EU Soil Observatory 2021, EUR 31152 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-55031-0, doi:10.2760/582573, JRC129999.
- Martin M.P., Dimassi B., Román Dobarco M., Guenet B., Arrouays D., Angers D.A., Soussana J.-F., Pellerin S. (2021). Feasibility of the 4 per 1000 aspirational target for soil carbon. A case study for France. *Global Change Biology*, 27 (11), 2458-2477. doi: 10.1111/GCB.15547.
- McBratney A.B., Mendonça Santos M.d.L., Minasny B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*. 117, 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
- McBratney A.B., Field D.J., Koch A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>.
- Minasny B., McBratney A.B. (2016). Digital soil mapping: a brief history and some lessons. *Geoderma*. 264, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.
- Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N.J., Badraoui M., Chude V., Baptista I., Mamo T., Yemefack M., Singh Aulakh M., Yagi K., Young Hong S., Vijarnsorn P., Zhang G.-L., Arrouays D., Black H., Krasilnikov P., Sobocká J., Alegre J., Henriquez C.R., Mendonça-Santos MdL., Taboada M., Espinosa-Victoria D., AlShankiti A., AlaviPanah S.K., Elsheikh Z.A.E., Hempel L., Camps Arbertain M., Nachtergaele F., Vargas R. (2016). World's soils are under threat. *SOIL*, 2, 79-82. <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016>
- Montanarella L. (2015). Agricultural policy: Govern our soils. *Nature* 528, 32-33. <https://doi.org/10.1038/528032a>
- Morvan X.P.P., Saby N.P.A., Arrouays D., Le Bas C., Jones R.J.A., Verheijen F.G.A., Bellamy P.H., Stephens M., Kibblewhite M.G. (2008). Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonisation. *Sci. Tot. Env.*, 391, 1-12.
- Mulder V.-L., Lacoste M., Richer-de-Forges A.C., Martin M.P., Arrouays D. (2016a). National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. *Geoderma*, 263, 13-34.
- Mulder V.-L., Lacoste M., Richer-de-Forges A.C., Arrouays D. (2016b). *GlobalSoilMap* France: High-resolution spatial modelling the soils of France up to two meter depth. *Sci. Tot. Env.*, 573, 1352-1369.
- Orgiazzi A., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Fernández-Ugalde O. (2018). LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. *European Journal of Soil Science*, 69, 140-153. doi: 10.1111/ejss.12499.
- Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. (2012). European Soil Data Centre: response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29, 329-338.
- Péres G., Vandenbulcke F., Guernion M., Hedde M., Beguiristain T., Douay F., Houot S., Piron D., Richard A., Bispo A., Grand C., Galsomies L., Cluzeau D. (211). Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). *Pedobiologia*, 54, S77-S87. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.09.015>
- Ramifehiarivo N., Brossard M., Grinand C., Andriamananjara A., Razafimbelo T., Rasolohery A., Razafimahatratra H., Seyler F., Ranaivoson N., Rabenarivo M., Albrecht A., Razafindrabe F., Razakamanarivo H. (2017). Mapping soil organic carbon on a national scale: Towards an improved and updated map of Madagascar. *Geoderma Regional*, 9, 29-38. doi: 10.1016/j.geodrs.2016.12.002.
- Ranjard L., Dequiedt S., Jolivet C., Saby N.P.A., Thioulouse J., Harmand J., Loisel P., Rapaport A., Fall S., Simonet P., Joffre R., Chemidlin-Prévost Bouré N., Maron P.A., Mougél C., Martin M.P., Toutain B., Arrouays D., Lemanceau P. (2010). Biogeography of Soil Microbial Communities: a Review and a Description of the Ongoing French National Initiative. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(2), 359-365.
- Ranjard L., Dequiedt S., Chemidlin Prévost-Bouré N., Thioulouse J., Saby N.P.A., Lelievre M., Maron P.A., Morin F.E.R., Bispo A., Jolivet C., Arrouays D., Lemanceau P. (2013). Turnover of bacterial diversity is driven by wide-scale environmental heterogeneity. *Nature Communications*, 4, paper 1434.
- Rasaei Z., Rossiter D.G., Farshad A. (2020). Rescue and renewal of legacy soil resource inventories in Iran as an input to digital soil mapping. *Geoderma Regional*. 21, e00262. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00262>
- Ratié C., Richer-de-Forges A.C., Berché P., Boulonne L., Toutain B., Saby N.P.A., Chenu J.-P., Laloua D., Ortolland B., Tientcheu E., Soler-Dominguez N., Jolivet C., Arrouays D. (2010). Le Conservatoire des Sols: La mémoire des sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 17 (3), 263-273.
- Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Bardy M., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemercier B., Sauter J., Voltz M. (2019b). Mapping of Soils and Land-Related Environmental attributes in France: analysis of end-users' needs. *Sustainability*, 11, 2940; doi:10.3390/su11102940.
- Richer-de-Forges A.C., Carré F., McBratney A.B., Bouma J., Arrouays D. (eds). (2019a). *Global Soil Security: Towards more science-society interfaces*. Taylor & Francis, CRC Press, 137 p.
- Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Bardy M., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemercier B., Sauter J., Voltz M. (2019b). Mapping of Soils and Land-Related Environmental Attributes in France: Analysis of End-Users' Needs. *Sustainability* 11, 2940. <https://doi.org/10.3390/su11102940>.

- Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Poggio L., Chen S., Lacoste M., Minasny B., Libohova Z., Roudier P., Mulder V.L., Nédélec H., Martelet G., Lemerrier B., Lagacherie P., Bourennane H. (2022). Hand-feel soil texture observations to evaluate the accuracy of digital soil maps for local prediction of particle size distribution. A case study in central France. *Pedosphere*, online, 5 July 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.009>.
- Saby N.P.A., Jolivet C., Ratié C., Chenu J.-P., Loubet B., Ghebleh-Goydaragh M., Oapale D., Lafont S. (2022). Soil data of ICOS sites. On line: <http://www.icos-etc.eu/icos/documents/instructions/soilsamp>.
- Samuel-Rosa A., Dalmolin R.S.D., Moura-Bueno J.-M., Teixeira W.G., Filippini Albad J.-M. (2020). Open legacy soil survey data in Brazil: geospatial data quality and how to improve it. *Scientia Agricola*. 77(1), e20170430. DOI: 10.1590/1678-992X-2017-0430.
- Sanchez P.A., Ahamed S., Carré F., Hartemink A.E., Hempel J., Huising J., Lagacherie P., McBratney A.B., McKenzie N.J., Mendonca-Santos M.d.L., Minasny B., Montanarella L., Okoth P., Palm C.A., Sachs J.D., Shepherd K.D., Vagen T.-G., Vanlauwe B., Walsh M.G., Winowiecki L.A., Zhang G.-L. (2009). Digital Soil Map of the World. *Science* 325, 680-681. <https://doi.org/10.1126/science.1175084>.
- Sandén T., Trajanov A., Spiegel H., Kuzmanovski V., Saby N.P.A., Picaud C., Bugge Henriksen C., Debeljak M. (2019). Development of an Agricultural Primary Productivity Decision Support Model: A Case Study in France. *Front. Environ. Sci.* <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00058>.
- Sigal-Guille C., Demenois J., Chevallier T., Bénédet F., Le Bas C., Bispo A., Corbière P. (2023). Protection et diffusion des données sur les sols : des règles à comprendre pour mieux les intégrer aux recherches. *Étude et Gestion des Sols*, 30, 05-18. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2022/10/EGS_2023_30_Sigal-Guille_05-18.pdf.
- Stevens A., Toth G., Panagos P., van Wesemael B., Montanarella L. (2014). Prediction of soil organic carbon content by diffuse reflectance spectroscopy using a local partial least square regression approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.022>.
- Terra F.S., Demattê J.A.M., Viscarra Rossel R.A. (2015). Spectral libraries for quantitative analyses of tropical Brazilian soils: comparing vis-NIR and mid-IR reflectance data. *Geoderma*, 255-256, 81-93. DOI : 10.1016/j.geoderma.2015.04.017
- Terrat S., Horigue W., Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelièvre M., Nowak V., Tripied J., Régnier T., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Karimi B., Bispo A., Maron P.-A., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L. (2017). Mapping and predictive variations of soil bacterial richness across France. *PLoS ONE*, 12(10), e0186766. doi:10.1371/journal.pone.0186766
- Van Camp G., Gentile A.-R., Bujarrabal B., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C., Selvaradjou S.K. (eds). (2004). Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. Volumes 1 to 6. JRC Publications Repository. 17 novembre 2004. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC28868>.
- van Egmond F., Fantappiè M. (eds). (2021). D6.1. Report on harmonized procedures for creation of databases and maps. 391 p. https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_D6.1_Report_on_harmonized_procedures_for_creation_of_databases_and_maps_final.pdf
- van Leeuwen J.P., Creamer R.E., Cluzeau D., Debeljak M.D., Gatti F., Henriksen C.B., Kuzmanovski V., Menta C.M., Peres G., Picaud C., Saby N.P.A., Trajanov A., Trinsoutrot-Gattin I., Visioli G., Rutgers M. (2019). Modeling of Soil Functions for Assessing Soil Quality: Soil Biodiversity and Habitat Provisioning. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 113, DOI: 10.3389/fenvs.2019.00113.
- Veerman C., Bastioli C., Biro B., Bouma J., Cienciala E., Emmett B., Frison E., Grand A., Filchev L.H., Pogrzeba M., Soussana J.-F., Vela C., Wittotowski E. (2020). Caring for soil is caring for life - Ensure 75% of soils are healthy by 2030 for food, people, nature and climate. Independent expert report. Report number: KI-02-20-673-EN-N. Eur. Comm. Publ. Office of the Eur. Union, Luxembourg. DOI: 10/2777/821504
- Viscarra Rossel R.A., Behrens T., Ben-Dor E., Brown D.J., Demattê J.A.M., Shepherd K.D., Shi Z., Stenberg B., Stevens A., Adamchuk V., Aichi H., Barthès B.G., Bartholomeus H.M., Bayer A.D., Bernoux M., Böttcher K., Brodský L., Du C.W., Chappell A., Fouad Y., Genot V., Gomez C., Grunwald S., Gubler A., Guerrero C., Hedley C.B., Knadel M., Morrás H.J.M., Nocita M., Ramirez-Lopez L., Roudier P., Campos E.M.R., Sanborn P., Sellitto V.M., Sudduth K.A., Rawlins B.G., Walter C., Winowiecki L.A., Hong S.Y., Ji W. (2016). A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Rev.*, 155, 198-230. DOI : 10.1016/j.earscirev.2016.01.012
- Vitousek P.M., Naylor R., Crews T., David M.B., Drinkwater L.E., Holland E., Johnes P.J., Katzenberger J., Martinelli L.A., Matson P.A., Nziguheba G., Ojima D., Palm C.A., Robertson G.P., Sanchez P.A., Townsend A.R., Zhang F.S. (2009). Nutrient Imbalances in Agricultural Development. *Science* 324, 1519-1520. <https://doi.org/10.1126/science.1170261>
- Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B., Richer-de-Forges A.C., Sauter J., Schnebel N. (2020). Possible futures of soil mapping in France. *Geoderma Regional*, 23, e00334. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00334>

Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société

P. Renault^(1*, 2), I. Cousin⁽³⁾, C. Gascuel-Odoux^(2,4), V. Antoni⁽⁵⁾, A. Bispo⁽³⁾, N. Bougon⁽⁶⁾, M. Desrousseaux⁽⁷⁾, I. Feix⁽⁸⁾, I. Joassard⁽⁵⁾, P. Laville⁽⁹⁾, A. Pierart⁽⁸⁾ et T. Caquet⁽²⁾

- 1) INRAE, Université d'Avignon, UMR 1114 EMMAH, 84914 Avignon Cedex 9, France
- 2) INRAE, Direction scientifique Environnement, 75338 Paris Cedex 07, France
- 3) INRAE, Info&Sols, 45075 Orléans Cedex 2, France
- 4) INRAE, Institut Agro, UMR 1069 SAS, 35042 Rennes Cedex, France
- 5) Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires, Service des données et études statistiques, 45061 Orléans Cedex 2, France
- 6) OFB, DRAS, 94300 Vincennes, France
- 7) CNAM, GeF, 72000 Le Mans, France
- 8) ADEME, 49000 Angers, France
- 9) Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Service Compétitivité et performance environnementale, 75349 Paris 07 SP, France

* Auteur correspondant : pierre.renault@inrae.fr

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

ADEME : Agence de la transition écologique
AOC : Appellation d'Origine Contrôlée
AOP : Appellation d'Origine Protégée
BCAE : Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales
CDB : Convention sur la diversité biologique
CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CNULCD : Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification
COP : Conférence des Parties
DCE : Directive-cadre sur l'eau
DEPE : Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études
DERU : Directive relative au traitement des eaux urbaines résiduaires
FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FEADER : Fonds européen agricole pour le développement rural

Comment citer cet article :

Renault P., Cousin I., Gascuel-Odoux C., Antoni V., Bispo A., Bougon N., Desrousseaux M., Feix I., Joassard I., Laville P., Pierart A. et 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, 207-221

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

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

FEAGA :	Fonds européen agricole de garantie
FNE :	France Nature Environnement
FREC :	Feuille de Route de l'Economie Circulaire
GIS Sol :	Groupeement d'Intérêt Scientifique Sol
GSP :	Global Soil Partnership (Partenariat Mondial des Sols)
ICPE :	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IGP :	Indication Géographique Protégée
INRA :	Institut national de la recherche agronomique
INRAE :	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
IPBES :	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques)
LBC :	Label bas-carbone
MAEC :	Mesures agro-environnementales et climatiques
MESALES :	Modèle d'Evaluation Spatiale de l'ALéa Erosion des Sols
NEC :	National Emissions reduction Commitments
OCDE :	Organisation de coopération et de développement économiques
ODD :	Objectif de Développement Durable
OFB :	Office Français de la Biodiversité
OMD :	Objectifs du Millénaire pour le développement
ONG :	Organisation non gouvernementale
ONU :	Organisation des Nations Unies
PAC :	Politique agricole commune de l'Union Européenne
PAE :	Programme d'action pour l'environnement de l'Union Européenne
PAT :	Projet alimentaire territorial
PCAET :	Plan climat air énergie territorial
PESERA :	Pan-European Soil Erosion Risk Assessment
PIA :	Programme d'investissements d'avenir
PLU :	Plan local d'urbanisme
PLUi :	Plan local d'urbanisme inter-communal
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le développement
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PRÉPA :	Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques
PPA :	Plan de protection de l'atmosphère
SCOT :	Schéma de cohérence territoriale
SEEA :	System of Environmental-Economic Accounting (Système de comptabilité économique et environnementale)
SNB :	Stratégie Nationale pour la Biodiversité
SNBC :	Stratégie Nationale Bas Carbone
SRADDET :	Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
SSP :	Sites et Sols Pollués
STEP :	station d'épuration des eaux usées
STICS :	Simulateur multi-disciplinaire pour les Cultures Standard
UE :	Union européenne
UNESCO :	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture)
USDA :	United States Department of Agriculture (Département de l'Agriculture des Etats-Unis)
ZAN :	Zéro Artificialisation Nette
ZSCN :	Zones soumises à des contraintes naturelles
ZSCS :	Zones soumises à des contraintes spécifiques

RÉSUMÉ

Les sols assurent de multiples services écosystémiques. Leur faible vitesse de formation en fait une ressource non renouvelable à l'échelle humaine. À l'interface entre géosphère et atmosphère, essentiels pour l'hydrosphère et la biosphère, à la fois écosystèmes et compartiments d'autres écosystèmes, les sols sont indispensables à la vie mais fragiles et exposés à de nombreuses pressions (érosion, pollutions, salinisation, tassement, imperméabilisation...). À l'échelle globale, 13 % de l'ensemble des sols sont déjà dégradés et, en absence d'actions, plus de 90 % pourraient l'être d'ici 2050. La prise de conscience de cette dégradation a amené différentes instances internationales, européennes, nationales et territoriales à mettre à leur agenda la connaissance, la protection et la restauration des sols.

Des indicateurs de qualité, de fonctions, de services, de vulnérabilité et/ou de pressions sont nécessaires pour la mise en œuvre, le pilotage et l'évaluation des politiques publiques de gestion durable des sols et des services écosystémiques associés. Si de nombreux indicateurs ont déjà été proposés, peu d'études ont discuté de leur pertinence et de leur déclinaison opérationnelle selon l'échelle et le contexte d'usage. Le GIS Sol s'est emparé de cette question en 2020, et ambitionne de croiser les besoins prioritaires des politiques publiques avec une analyse des indicateurs de qualité des sols proposés dans la littérature scientifique, pour identifier les lacunes et évaluer les possibilités de déclinaison opérationnelle (accessibilité des données et méthodes, modèles, variabilité liée à la qualité caractérisée vs variabilité résiduelle, etc.). Cet article présente un état des lieux des besoins et des démarches envisagées puis dresse des perspectives de travail sur ce champ pour le GIS Sol.

Mots-clés

Sol, qualité des sols, propriétés, services écosystémiques, indicateur, vulnérabilité, menace, exposition, restauration, gestion durable, politique publique

SUMMARY

FROM SOIL PROPERTIES TO QUALITY INDICATORS TO SUPPORT PUBLIC POLICIES AND MEET THE NEEDS OF SOCIETY

Soils provide ecosystem services. Their low formation rate makes them a non-renewable resource at the human scale. At the interface between geosphere and atmosphere, an essential part of hydrosphere and biosphere, both ecosystems and compartments of other ecosystems, soils are essential to life but fragile and exposed to many threats (erosion, pollution, salinization, compaction, impermeabilization etc.). At the planetary level, 13% of all the soils are already degraded and without any action more than 90% could be degraded by 2050. The consideration of their current or future degradation has led various international, European, national or local bodies to promote soil knowledge, protection and restoration on their agenda. Indicators of soil quality, functions, services, vulnerability and/or threats are necessary to implement, manage and evaluate public policies for a real sustainable soil management and ecosystem services preservation. Despite many indicators have already been proposed, few studies have developed operational application adapted to scale, data availabilities, and local context in order to support public policies. The GIS Sol has a decisive role to play in this area to go beyond the simple provision of soil data by delivering soil quality indicators. This paper analyses current public policies at various levels and their needs for soil quality indicators. It then discusses the opportunities and challenges in this domain for the GIS Sol.

Key-words

Soil, soil quality, properties, ecosystem services, indicator, vulnerability, threat, exposition, restoration, sustainable management, policy.

RESUMEN

DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO A LOS INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO, EN APOYO DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS Y EN RESPUESTA A LAS NECESIDADES DE LA SOCIEDAD

Los suelos proporcionan múltiples servicios ecosistémicos. Su baja velocidad de formación los convierte en un recurso no renovable a escala humana. En la interfaz entre la geosfera y la atmósfera, esenciales para la hidrosfera y la biosfera, a la vez ecosistemas y compartimentos de otros ecosistemas, los suelos son indispensables para la vida pero frágiles y expuestos a numerosas presiones (erosión, contaminación, salinización, compactación, impermeabilización...). A escala mundial, el 13 % de todos los suelos ya están degradados y, en ausencia de medidas, más del 90 % podría estarlo de aquí a 2050. La toma de conciencia de esta degradación llevó a diferentes instancias internacionales, europeas, nacionales y territoriales a poner en su agenda el conocimiento, la protección y la restauración de los suelos. Se necesitan indicadores de calidad, funciones, servicios, vulnerabilidad y/o presiones para la aplicación, el pilotaje y la evaluación de las políticas públicas de ordenación sostenible de la tierra y los servicios ecosistémicos asociados. Aunque ya se propusieron muchos indicadores, son pocos los estudios que discutieron su pertinencia y su declinación operacional según la escala y el contexto de uso. El GIS Sol se hizo cargo de esta cuestión en 2020, y aspira a cruzar las necesidades prioritarias de las políticas públicas con un análisis de los indicadores de calidad de los suelos propuestos en la literatura científica, para identificar las deficiencias y evaluar las posibilidades de declinación operativa (accesibilidad de los datos y métodos, modelos, variabilidad relacionada con la calidad caracterizada frente a variabilidad residual, etc.). Este artículo presenta un inventario de las necesidades y de los enfoques previstos y presenta las perspectivas de trabajo en este campo para el GIS Sol.

Palabras clave

Suelo, calidad del suelo, propiedades, servicios ecosistémicos, indicador, vulnerabilidad, amenaza, exposición, restauración, gestión sostenible, política pública.

Les sols assurent de multiples fonctions, notamment l'ancrage des plantes, leur alimentation en eau et en éléments nutritifs, et d'autres fonctions propices à leur développement (aération...). Ils hébergent plus de 25 % de la biodiversité mondiale (Bach *et al.*, 2020) et les multiples organismes qui y vivent participent à leur genèse (Verboom et Pate, 2013; Dey et Bhattacharyya, 2019), à leur structuration et à l'exploration du milieu par les plantes (Ganugi *et al.*, 2019; Young *et al.*, 1998) ainsi qu'aux cycles biogéochimiques (Smith *et al.*, 2015); ils interagissent aussi entre eux (Heinen *et al.*, 2018). Les propriétés des sols déterminent la taille du réservoir en eau utilisable par les plantes, le partage entre ruissellement, infiltration et drainage, la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, notamment leur composition en nutriments (N, P, K, S...), ainsi que les niveaux de contamination par des composés dangereux pour la vie du sol, des plantes et de l'Homme (Gavrilescu, 2021). Leurs propriétés impactent aussi leur capacité à stocker du carbone (Pellerin *et al.*, 2020) et régulent les flux de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O) (Pedersen *et al.*, 2021). En assurant ces fonctions, les sols contribuent ainsi à de nombreux services écosystémiques (Dominati *et al.*, 2010).

Depuis plusieurs décennies, les sols font face à des pressions d'une intensité sans précédent (FAO, 2015) : érosion, contaminations chimiques, salinisation, désertification, tassement et imperméabilisation, artificialisation. À l'échelle planétaire, on estime qu'environ 13 % des sols sont dégradés (FAO, 2021) et que 90 % des sols pourraient l'être en 2050 en absence de mesure adéquate ; au niveau de l'Union européenne, on estime qu'environ deux tiers des sols sont dégradés (Veerman *et al.*, 2020). Leur vitesse de formation étant négligeable à l'échelle humaine (Verheijen *et al.*, 2009), il est indispensable de les protéger, de les utiliser de manière durable mais aussi de les restaurer lorsqu'ils sont dégradés. Les politiques publiques s'y engagent de plus en plus, cet engagement appelant en retour des appuis scientifiques de différentes formes, notamment en termes d'inventaire des sols, de suivi de leurs évolutions, et d'identification des pressions auxquelles ils sont exposés (Bellec *et al.*, 2015).

Cet article s'inscrit dans ce contexte d'évolution des politiques publiques et du nécessaire appui qu'elles suscitent. Il décrit (i) la place et la vision des sols dans les agendas des politiques publiques internationales, européennes et françaises, puis (ii) les besoins en indicateurs qui en résultent. Il discute ensuite des difficultés à caractériser l'état des sols, leurs évolutions lentes, les besoins nouveaux en termes de résolution spatiale et de fréquence d'observations, la nécessité d'harmoniser les méthodes d'estimation des indicateurs de qualité des sols, les incertitudes et le cadre d'interprétation qui leur sont associés. Doran et Parkin (1997) définissent la qualité d'un sol comme « *la capacité d'un sol à fonctionner pour soutenir la productivité biologique, maintenir la qualité de l'environnement et promouvoir la santé des plantes et des animaux, dans les*

limites de l'écosystème et de l'utilisation des terres ». Bunemann *et al.* (2018) ont proposé une large revue du concept de qualité des sols. Récemment, ce concept s'est élargi pour traiter d'évaluation des sols, de leur mode de gestion, des risques, des évolutions des sols et de leur restauration.

LES SOLS À L'AGENDA DES POLITIQUES PUBLIQUES INTERNATIONALES, EUROPÉENNES ET FRANÇAISES

Politiques internationales

Depuis 40 ans, les sols ont progressivement pris une place importante dans les politiques internationales, avec notamment la publication par la FAO de la Charte Mondiale sur les Sols qui liste les principales voies de dégradation des sols ainsi que de nombreux défis à relever (FAO, 1981). Cette charta a été actualisée en 2015 avec la mise en avant des services écosystémiques assurés par les sols autres que les seuls services de production (FAO, 2015). D'autres enjeux ont été soulignés lors du 3^e Sommet de la Terre (ou Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement) tenu à Rio de Janeiro en 1992; les sols sont alors inscrits à la croisée des 3 conventions issues de ce sommet (Convention sur la diversité biologique – CDB; Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques – CCNUCC; Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification – CNULCD) (Grubb *et al.*, 2019; Parson *et al.*, 1992). Les sols sont aussi présents dans Agenda 21, plan d'action adopté lors de ce même Sommet et composé de 27 principes réunissant 2 500 recommandations pour un développement durable au XXI^e siècle, mais dont la plupart n'ont jamais été mises en œuvre (Vaillancourt, 2002).

Le concept de « Une seule santé » (*OneHealth*) a émergé dans les années 2000 avec la prise de conscience des liens étroits entre santé humaine et santé animale (domestique et sauvage), complété ultérieurement d'une prise en compte de l'environnement (et donc des sols), notamment du fait des apports de l'écologie de la santé, discipline qui étudie le rôle des facteurs environnementaux ou écologiques dans l'origine et la transmission de certaines pathologies (Destoumieux-Garçon *et al.*, 2018; Morand *et al.*, 2020). En 2000, le Sommet du Millénaire à New-York a défini 8 objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) à atteindre en 2015, dont un visait à assurer un environnement durable sans toutefois d'allusion spécifique aux sols. Leur ont succédé les 17 objectifs de développement durable (ODD) de l'ONU – avec 169 cibles pour 2030 – rassemblés dans l'Agenda 2030 et adoptés en 2015 par l'Assemblée générale de l'ONU comme l'aboutissement d'un processus lancé lors du 5^e sommet de la Terre (« Rio +20 ») à Rio de Janeiro en 2012 (Degron, 2020). Quatre de ces ODD

impliquent très directement les sols : l'ODD 2 « Faim zéro », l'ODD 13 sur les changements climatiques, l'ODD 6 sur la qualité de l'eau et l'ODD 15 sur la vie terrestre. Mais les sols ont une influence directe sur l'ensemble des autres ODD, notamment les ODD 1 « Pas de pauvreté », 3 « Bonne santé et bien-être », 7 « Énergie propre et d'un coût abordable », et 12 « Consommation et production responsables ». De ce fait, l'évaluation des avancées sur ces ODD repose sur des indicateurs incluant peu ou prou une information sur les sols.

Fin 2013, l'Assemblée générale de l'ONU a déclaré l'année 2015 comme « année internationale des sols », et le 5 décembre de chaque année comme la « journée mondiale des sols ». Au niveau de l'ONU, d'autres organes que la FAO jouent un rôle important dans la politique internationale sur les sols : le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) créé en 1972 suite au premier sommet de la Terre (ou Conférence des Nations-Unies sur l'environnement humain de Stockholm) (UNEP, 2016) ; la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) créée en 2012, les sols étant au cœur de ses thématiques tant par la biodiversité qui y vit que par les fonctions des sols et les interactions entre biodiversité et fonctions ; le Partenariat Mondial des Sols (*Global Soil Partnership* – GSP) créé lui aussi en 2012 et qui vise à développer/renforcer les collaborations entre toutes les parties prenantes, des utilisateurs des sols aux décideurs politiques, pour promouvoir la gestion durable des sols et de leurs services écosystémiques. D'autres structures des Nations Unies sont concernées par les sols : le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) ; l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) ; le système de comptabilité économique et environnementale (SEEA), établi dès 1993 pour relier environnement et économie (Obst, 2015), pour lequel les sols sont considérés comme une ressource (ou un actif au sens comptable s'insérant dans le cadre plus large de la comptabilité des écosystèmes) (ONU, 2016).

Indépendamment de l'ONU, il faut mentionner l'implication de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), créée en septembre 1961, comme acteur à l'international des politiques liées aux sols avec des activités tournées vers l'agriculture et l'environnement et la mise en place d'indicateurs environnementaux pour l'agriculture (OECD, 2001).

POLITIQUE EUROPÉENNE

Dès 1972, une charte européenne des sols (révisée en 2003) a été adoptée (CE, 1972 ; CMCE, 1972 ; Billet, 2017, 2018 ; Bertrand, 2018 ; Boer *et al.*, 2017) et plusieurs initiatives ont vu le jour en Europe avant 2000, notamment : le protocole d'application dans le domaine des sols de la Convention Alpine de 1991 (Cuyppers et Randier, 2009) dit protocole « Protection

des Sols » de 1998 ; et la directive sur l'utilisation des boues de station d'épuration des eaux usées (STEP) en agriculture (CCE, 1986) pour préserver les sols de contaminations. Les menaces suivantes sur les sols ont alors été explicitement identifiées par la Commission de la Communauté européenne (CEC, 2002) : érosion, diminution de la matière organique, contaminations, salinisation, tassement, appauvrissement de la biodiversité, imperméabilisation, inondations et glissements de terrain.

En 2004, une Directive du Parlement européen et du Conseil sur la responsabilité environnementale a inclus un volet « sol » focalisé sur les contaminations chimiques, voire biologiques, susceptibles d'avoir un impact sur la santé humaine. En 2006, une proposition de directive cadre sur les sols reprenant plus largement les menaces identifiées en 2002 a été soumise par la Commission des Communautés européennes au Parlement européen et au Conseil (CE, 2006a, 2006b ; CCE, 2006). Le projet comportait deux grands axes : (i) le recensement des zones à risques de dégradation des sols et la prise de mesures pour ces zones ; et (ii) un inventaire des sites contaminés et la mise en œuvre de mesures d'assainissement. Adoptée en première lecture par les députés européens en 2007, la proposition de Directive a été rejetée la même année par quatre pays (Allemagne, Royaume-Uni, Pays-Bas et Autriche), la France s'abstenant. La Commission européenne a définitivement retiré ce texte en 2014, sans donner de raison officielle, mais probablement en raison d'inquiétudes sur les enjeux sous-jacents (politique industrielle, activités agricoles) et sur les coûts liés aux obligations de police et de réhabilitation des sites pollués (Chen, 2019 ; Jourda et Pellevat, 2021). Ce projet de directive était l'un des 4 piliers de la stratégie européenne sur la protection des sols, les 3 autres, bien développés (CE, 2012), étant l'intégration de la protection des sols dans d'autres politiques thématiques européennes (PAC notamment), la communication/sensibilisation et la recherche.

Diverses initiatives européennes ont concerné directement ou indirectement les sols à la même époque et un peu plus tard, avec notamment la Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources en 2011, le 7^e Programme d'action pour l'environnement (2013-2020), la Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles, la Directive EU 2016/2284 dite « Directive NEC 2 » sur la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques (dont NH₃, les NO_x et les PM_{2.5}) dont certaines à partir des sols, le règlement UE 2018/841 relatif à la prise en compte des émissions et des absorptions de gaz à effet de serre résultant de l'utilisation des sols, du changement d'affectation des sols et de la foresterie, et le règlement UE 2019/1009 relatif à la mise sur le marché de produits fertilisants. D'autres politiques européennes protègent indirectement ou implicitement les sols en limitant d'un côté les contaminants dans les eaux et dans les boues de station d'épuration des eaux usées, dont environ 70 % sont épandues sur les sols agricoles avec initialement la

Directive 91/271/CEE relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (DERU) et la Directive-cadre 2000/60/CE sur l'Eau (DCE). On peut ajouter à celles-ci la Directive 91/676/CEE Nitrates (CCE, 1991) qui, promouvant les couverts végétaux pour préserver la qualité des eaux, contribue à différents services écosystémiques des sols.

Depuis 2019, l'Union européenne affiche une très forte ambition autour des sols (Toth et al., 2018). Le Pacte vert de l'Union européenne (2019) poursuit différents objectifs dont certains impliquent les sols. À titre d'exemple, il a débouché : en 2020, sur le Plan d'objectifs climat pour 2030 et sur la stratégie en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030, en y incluant les sols (lutte contre l'étalement urbain et leur imperméabilisation, contre leur pollution, contre la déforestation et le surpâturage, réhabilitation de friches contaminées) ; en 2021, sur le règlement UE 2021/1119 pour parvenir à la neutralité climatique, sur un plan d'action zéro pollution pour l'eau, l'air et les sols, et sur la stratégie 'de la ferme à la table' avec notamment des considérations sur l'usage des pesticides.

Parallèlement, en 2019, un Comité de mission 'Santé des sols et alimentation' a été mis en place. Il a produit à l'automne 2020 le rapport *'Caring for soil is caring for life'* qui a amené la Commission européenne à adopter la nouvelle Mission intitulée *'A soil deal for Europe'* (Panagos et al., 2022). Cette Mission vise la préservation et la restauration des sols. Son action repose pour partie sur l'élaboration d'un cadre harmonisé de suivi des sols. Enfin, l'Observatoire des sols de l'Union européenne a été lancé fin 2020. Il doit contribuer à la production de données utiles pour différentes politiques européennes et leurs déclinaisons nationales (Maréchal et al., 2021).

Deux textes très importants préfigurent une nouvelle proposition réglementaire en 2023 de la Commission européenne pour la protection, l'utilisation durable et la restauration des sols : la résolution du Parlement européen du 28 avril 2021 sur la protection des sols et la communication de la Commission au Parlement européen et au Conseil du 17/11/2021 'EU Soil strategy for 2030: reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate'. Divers objectifs sont mis en avant dans ces deux textes : la protection et la restauration des sols ; l'atténuation du changement climatique (stockage de C) ; l'évaluation des sols et de leurs potentialités de production (agriculture et forêt ; e.g., zones soumises à des contraintes naturelles ou à des contraintes spécifiques – ZSCN et ZSCS) ; les paiements pour services environnementaux (éco-régimes ou *eco-schemes*, paiement vert...) ; les investissements verts et les labels européens « verts » portant sur les investissements, la qualité des produits et/ou sur leur impact environnemental (e.g., label bio) ; la valeur patrimoniale des sols et de leur biodiversité. Ces deux textes insistent sur le besoin d'indicateurs harmonisés pertinents de la qualité des sols.

Enfin, la PAC 2023-2027 devrait contribuer à renforcer la préservation des sols, notamment par l'introduction de

différentes aides : les éco-régimes nouvellement définis dans le premier pilier (FEAGA), diverses mesures dans le second pilier (FEADER), la conditionnalité des aides associées aux bonnes conduites agricoles et environnementales (BCAE). L'évaluation future de la PAC, qui intègre désormais l'évolution du carbone du sol, devrait valider cette ambition, alors que l'évaluation de l'impact de la PAC sur la période précédente montre qu'elle n'a pas été très efficace en termes de gestion durable des sols (Alliance Environnement, 2020).

Politique française

Au niveau de la France et de ses territoires (régions, grandes métropoles...), il n'y a pas à proprement parler de cadre législatif global et intégratif pour la protection, l'utilisation durable et/ou la restauration des sols, mais diverses politiques sectorielles intégrant les sols. Les textes réglementaires sont insérés principalement dans le Code de l'environnement, le Code rural, le Code de l'urbanisme, le Code général des collectivités territoriales, le Code forestier, et le Code général de la propriété des personnes publiques. S'y ajoutent des stratégies nationales et autres feuilles de routes pouvant donner lieu à diverses déclinaisons régionales, intercommunales ou communales comme les schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), les schémas de cohérence territoriale (SCOT), les plans locaux d'urbanisme et plans locaux d'urbanisme inter-communaux (PLU et PLUi), les plans climat air énergie territoriaux (PCAET), ou encore les projets alimentaires territoriaux (PAT).

Divers objectifs et diverses stratégies – correspondant souvent à des déclinaisons françaises de directives européennes – sont poursuivis dans ces textes. Ils visent principalement :

- (i) l'objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN), issu de la loi Climat et Résilience, avec trois décrets très récents sur l'artificialisation des sols (décrets n°2022-762 et n°2022-763 du 29 avril 2022 ; décret n°2022-1312 du 13 octobre 2022), en cohérence avec la feuille de route « pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources » de 2011, et plus généralement la gestion foncière (Gitton et Fallon, 2020) ;
- (ii) l'utilisation des sols pour stocker du carbone (en lien notamment avec l'initiative 4p1000 lancée lors de la COP21 et contribuer à l'atteinte des objectifs climatiques de la France, en cohérence avec la stratégie nationale bas carbone (SNBC) de 2015 (révisée en mars 2020 et faisant l'objet actuellement d'une nouvelle révision) et en lien avec la démarche du label bas-carbone (LBC) ;
- (iii) la transition agroécologique, avec la loi n°2018-938 dite loi Egalim visant également à mieux répondre aux attentes sociétales et environnementales, et le plan stratégique national de mise en œuvre en France de la PAC 2023-2027 qui tente peu ou prou de soutenir cette transition, avec notamment l'introduction des éco-régimes dans le

premier pilier (FEAGA), avec des mesures agro-environnementales et climatiques – MAEC – dans le deuxième pilier (FEADER)), et avec la conditionnalité des aides liées à de Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales (BCAE), la plupart de ces dernières étant très liées au sol ;

- (iv) la prévention de la pollution des sols par (1) les intrants agricoles, comme les produits phytosanitaires, (2) les matières fertilisantes de synthèse (autorisations de mise sur le marché dans le code rural), (3) les effluents d'élevage (autorisation sur les additifs, notamment des oligoéléments, dans les aliments pour animaux d'élevage), (4) les déchets comme les boues de STEP (code de l'environnement, partie relative à l'eau), (5) les effluents et déchets industriels (code de l'environnement, partie relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)). A cet item peut être rattaché le volet agricole de la Feuille de Route de l'Economie Circulaire qui vise à protéger les sols agricoles lors de l'épandage de matières fertilisantes (issues ou non de déchets) ;
- (v) la gestion des sols pollués avec la loi relative aux ICPE de 1976, la loi sur la prévention des risques technologiques et naturels et la réparation des dommages de 2003, le guide relatif aux modalités de gestion des Sites et Sols Pollués (SSP) de 2007, la prise en compte des sols dans l'article 173 de la loi n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (dite loi ALUR), et la gestion des sols excavés (avec des guides actualisés) ;
- (vi) la préservation de la biodiversité avec la loi Biodiversité de 2016, le plan Biodiversité de 2018, la 3^e stratégie nationale biodiversité (SNB3) pour 2022-2030 dont un premier volet dit « SNB 1er volet pré-COP15 » est sorti, mais qui reste à finaliser après la COP15 et à décliner en feuille de route avec des mesures précises. La SNB 3 envisage notamment diverses mesures concernant les sols (notamment sa mesure 1.3 « Élaborer une stratégie nationale pour la protection et la restauration des sols ») ;
- (vii) la limitation des contaminants dans les eaux et dans les boues de STEP apportés aux sols, avec le dispositif des agences de l'eau, en lien au niveau européen principalement avec la DCE et la DERU ;
- (viii) la protection des sols de montagne contre l'érosion avec le Livre IV : Forêts de protection - Lutte contre l'érosion du Code forestier ;
- (ix) la prévention de la pollution, de l'acidification et de l'eutrophisation des sols par les retombées atmosphériques (Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PRÉPA), Plans de protection de l'atmosphère (PPA), réglementation relative aux ICPE, aux émissions des véhicules à moteur, aux combustibles destinés au chauffage, etc.) ;
- (x) la préservation, la limitation ou la compensation des impacts sur les sols des projets et des documents de pla-

nification (les évaluations environnementales et les études d'impacts doivent comprendre un volet « sol », ce volet étant malheureusement souvent négligé dans les faits).

La prise en compte des potentialités des sols agricoles, forestiers et naturels s'insère par ailleurs dans l'action foncière (paysage, urbanisation), qui intègre peu ou prou la description de la patrimonialité du sol et sa qualification socio-économique via les zonages de type Appellation d'Origine Contrôlée ou Protégée (AOC/AOP) et Indication Géographique Protégée (IGP). Elle est aussi mobilisée pour l'évaluation environnementale des documents de planification territoriale (énergie-climat, urbanisme) et les études d'impacts des projets opérationnels (aménagements, photovoltaïsme, éolien, géothermie...). Enfin, il faut noter que les potentialités des sols sont aussi intégrées dans des initiatives hors politiques publiques, par exemple celles concernant les transactions foncières ou les assurances. Les services écosystémiques auxquels contribuent les sols sont désormais inclus dans le volet ZAN de la loi Climat et Résilience ; à notre connaissance, ils ne sont pas mentionnés dans d'autres textes réglementaires français.

UNE FORTE DEMANDE D'INDICATEURS DE QUALITÉ DES SOLS POUR LES POLITIQUES PUBLIQUES

Une diversité d'attendus et un foisonnement d'initiatives

L'ambition de qualifier l'état et le fonctionnement des sols, d'évaluer leurs fonctions ou les pressions auxquelles ils sont exposés, correspond ainsi à un besoin réel et partagé de nombreuses politiques publiques. Ce besoin est aussi identifié par les professionnels du monde agricole et de l'environnement et plus largement par la société tel qu'exprimé par différentes organisations (Terre de Liens, FNE...), en soi et en lien avec l'application des politiques publiques. Cette demande fait bien écho aux politiques publiques évoquées précédemment autour des grands enjeux suivants :

- (i) la transformation des systèmes agricoles selon les principes de l'agroécologie, incluant la réduction des consommations d'eau, de pesticides et d'engrais de synthèse, la mise en exergue de fonctions assurées par l'écosystème, de la structure des sols et de leur stabilité structurale, eu égard à leur portance, de leur protection contre l'érosion, de l'infiltrabilité et de la rétention d'eau, de leur aération et la colonisation racinaire et la préservation du foncier agricole ;
- (ii) la gestion et l'adaptation des forêts dans le contexte du changement climatique, dont la gestion de la fertilité et de la portance des sols forestiers ;

- (iii) l'atténuation du changement climatique via le stockage de C dans les sols, et plus globalement via la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre, et la préservation de la biodiversité dans tous les écosystèmes (agricoles, urbains, forestiers...);
- (iv) l'aménagement rural et urbain, les changements d'usage, l'artificialisation des sols (Desrousseaux *et al.*, 2019), la restauration des sols en lien avec la reconquête agricole et des friches (pour des jardins urbains...) et la gestion des terres excavées, les restrictions d'usages des sols et l'orientation des modes de gestion;
- (v) la santé humaine en lien avec celle des écosystèmes (One Health) : plans alimentaires territoriaux, définition de valeurs seuils de contamination en lien avec la qualité des produits agricoles et la santé humaine, prise en compte d'un cumul d'expositions (exposome) etc, la responsabilité environnementale et les directives sur les émissions industrielles (cf. directive UE sur les émissions industrielles et directive UE sur les émissions nationales (NEC2).

À titre de premier exemple, dans certains cas lors d'une cessation d'activité industrielle, le site doit être remis dans un état tel qu'il ne présente plus de risque pour la santé humaine et pour l'environnement en s'adaptant à l'utilisation future selon l'approche française en vigueur d'après la directive européenne sur les émissions industrielles. À titre de deuxième exemple, la directive européenne sur les émissions nationales de certains polluants atmosphériques demande aux états membres de surveiller les effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes aquatiques et terrestres, dont l'acidification et l'eutrophisation des sols forestiers et « naturels ».

Plus généralement, tous ces enjeux demandent de qualifier les sols, leur état, leurs fonctions ou les services qu'ils rendent, leurs évolutions (changements d'états), les pressions et menaces dont ils font l'objet, et dans certains cas les impacts de leur dégradation, par des indicateurs robustes et fiables allant au-delà de leurs simples propriétés, reposant sur des bases scientifiques, transparents dans leur mode de calcul et dans la mobilisation des données.

De nombreuses initiatives des collectivités territoriales (Territoires d'innovation de la 3^e vague du Programme d'investissements d'avenir – PIA), d'instituts techniques (méthodes label bas-carbone par exemple), d'entreprises privées et d'ONG relaient ces besoins en indicateurs ou les anticipent en produisant elles-mêmes des indicateurs. Il y a un véritable bourgeonnement d'indicateurs et de multiples façons de les calculer et de les mettre en œuvre, avec des bases scientifiques plus ou moins bien explicitées. La littérature scientifique elle-même fleurit de cadres conceptuels pour définir des indicateurs (voir par exemple Andrews *et al.*, 2004 et Calzolari *et al.*, 2016), mais peu d'études ont testé leur application, démontré leur opérationnalité ou leur intérêt pour l'usage, ou bien encore discuté de leur pertinence selon l'échelle et le contexte d'usage.

Il y a donc un besoin important d'une définition de cadres de référence opérationnels, basés sur des travaux scientifiques, contextualisés et éprouvés si possible par l'usage, et sur lesquels l'ensemble des initiatives pourra s'appuyer. De tels cadres doivent inclure :

- (i) un choix d'indicateurs, avec leur contexte d'utilisation (finalité(s), échelle(s), politique publique concernée...) et leur définition;
- (ii) des méthodes, pour les construire et les calculer (choix des variables, manière de les assembler, bases de données sollicitées...);
- (iii) des cadres d'interprétation incluant des valeurs de référence, voire des seuils, qui peuvent dépendre du contexte d'étude.

Les indicateurs portant sur les sols peuvent qualifier des états réels, des états potentiels, sous réserve de changements, ou des évolutions. Le besoin de plus en plus exprimé d'évaluer des changements d'état sous condition de gestion des sols nécessite des dispositifs de surveillance bien documentés et des modèles de simulation. Par ailleurs, la production d'indicateurs s'inscrit dans une approche interdisciplinaire, tant du point de vue de la conception des indicateurs que de leur usage (*Figure 1*).

Des indicateurs de qualité des sols en lien avec la notion de services écosystémiques

Le concept de service écosystémique appliqué aux sols établit des relations, allant des propriétés des sols, aux processus et fonctions, jusqu'aux services rendus à la société ou à des acteurs spécifiques (Greiner *et al.*, 2017) (*Figure 2*; Dominati *et al.*, 2010; Fossey *et al.*, 2020). Les services écosystémiques en lien avec le fonctionnement des sols sont nombreux (*Tableau 1*).

Un cadre conceptuel pour traiter des services écosystémiques des sols peut prendre explicitement en compte leurs usages et les modes de gestion qui les modulent (Fossey *et al.*, 2020). Il permet alors ainsi de distinguer des indicateurs de services écosystémiques effectifs (i.e., liés aux modes de gestion actuels) et des indicateurs de services écosystémiques potentiels (i.e., sous condition de gestion des sols). Les indicateurs de qualité des sols, ou de services écosystémiques en lien avec le fonctionnement des sols peuvent être d'origines très variées. Ce sont :

- (i) des observations ou des mesures, mais la littérature scientifique souligne le faible nombre de propriétés des sols prises en compte (Adhikari et Hartemink, 2016; Ellili-Bargaoui *et al.*, 2021); il peut s'agir de données issues de recherches participatives,
- (ii) des « proxies », c'est-à-dire des mesures de variables (teneur en argiles par exemple) qui sont utilisées à la place d'autres variables dont la mesure serait trop difficile ou

Figure 1 : Modèle conceptuel connectant les arènes sociale, scientifique et politique, et les domaines anthropocentrique et environnemental (d'après Fossey et al. (2020)).

Figure 1: Conceptual model connecting social, scientific and policy arenas, and anthropocentric and environmental domains (de Fossey et al. (2020)).

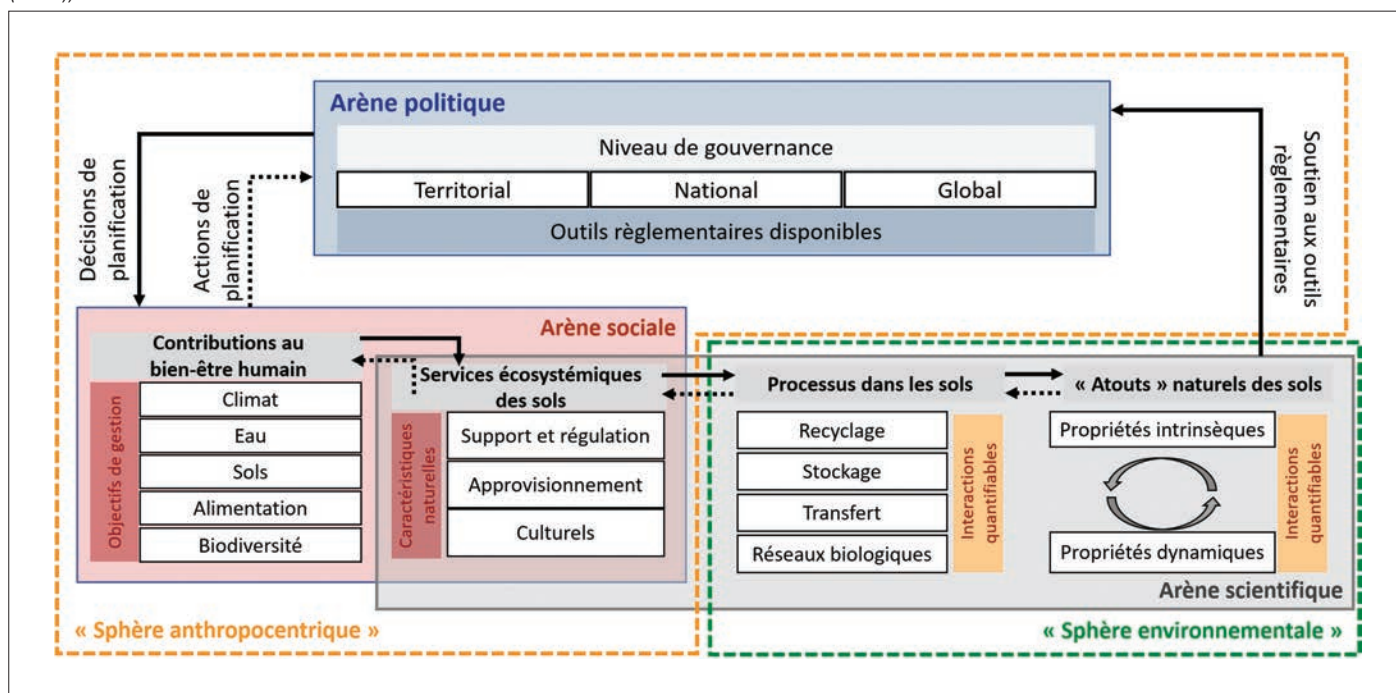


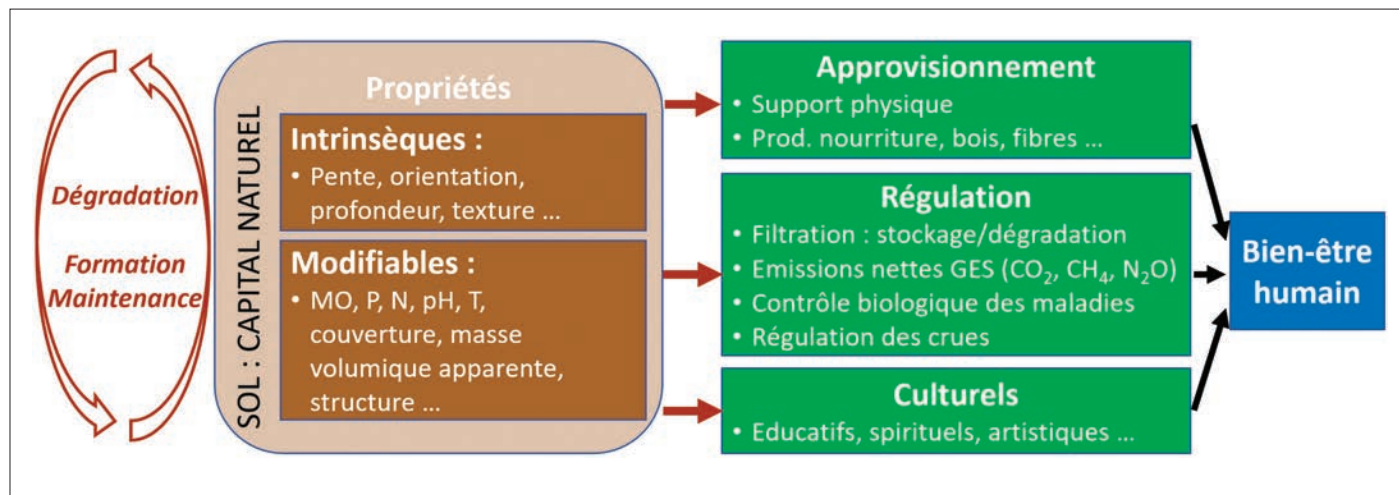
Tableau 1 : Services écosystémiques.

Table 1: Ecosystem services.

Service	Commentaire
Approvisionnement / fourniture	en aliments, bioénergies, biomatériaux, eau..., en lien avec la disponibilité en eau et en nutriments et avec les régulations biologiques (ravageurs, maladies et auxiliaires des cultures...)
	en matériaux (briques crues ou cuites, argile pour la poterie, tourbe pour les supports de culture...)
	en organismes et gènes pour l'industrie (pharmaceutique, agroalimentaire, du traitement des pollutions, bioraffinerie...)
Régulation	du climat, en lien avec le stockage de C dans le sol, les émissions nettes de gaz à effet de serre (CO ₂ , N ₂ O, CH ₄) et l'évapotranspiration
	de l'eau en quantité (régulation des risques d'inondation...) et en qualité (rétention, dégradation, purification...)
	de la qualité de l'air (particules fines formée en présence de NH ₃ , O ₃ en équilibre avec les NO _x et en lien avec la présence de composés organiques volatils dont CH ₄ ...)
Gestion et recyclage	des effluents et déchets
Support physique	pour l'activité humaine (bâtiments, routes...) et, de façon plus anecdotique, de régulation de la température dans les bâtiments
Culturels	esthétique des paysages, mémoire du passé...

Figure 2 : Passer des propriétés aux fonctions et services des sols (simplifié d'après Dominati *et al.*, 2010)).

Figure 2: From soil properties to soil services (simplified from Dominati *et al.*, 2010)).



trop onéreuse (voir par exemple Bailey *et al.*, 2018), ou des estimations issues de fonctions de pédotransfert ou de méthodes de télédétection ou d'apprentissage, etc. (voir par exemple Diaz-Gonzalez *et al.*, 2022).

- (iii) des valeurs simulées issues de modèles souvent fondés sur des processus. Ainsi en France, le modèle STICS a été beaucoup utilisé pour évaluer certains services écosystémiques en lien avec le fonctionnement des sols agricoles (voir par exemple Demestihis *et al.*, 2018; Obiang Ndong *et al.*, 2021);
- (iv) des données de différents types, fondées sur des données sols mais associant aussi des données de topographie, de climat, de paysage...

On peut distinguer des indicateurs de qualité, au sens d'état des sols (pH, masse volumique, teneur en carbone...), des indicateurs au sens de « bon état » et qui requièrent un cadre d'interprétation (potentiel de séquestration du carbone, biodiversité...), ou bien encore des jeux d'indicateurs ou des associations d'indicateurs. La plus-value de l'utilisation de plusieurs indicateurs complémentaires peut être mise en valeur dans des diagrammes de type « radar » (Calzolari *et al.*, 2016; Kuzyakov *et al.*, 2020). Des indicateurs intégrés, souvent appelés « soil quality index » (Andrews *et al.*, 2004; Drobniak *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2013; Martin *et al.*, 2016) ont aussi été proposés pour prendre en compte la multifonctionnalité des sols. Le concept de « sécurité des sols » ou *soil security* (McBratney *et al.*, 2014) s'inscrit dans cette perspective. Il souligne l'importance de l'intégration des sols dans les politiques publiques, comme condition à leur bon déploiement (McBratney *et al.*, 2012). Peu de développements d'indicateurs et d'étude de cas l'ont mobilisés (Yang *et al.*, 2018).

Des indicateurs de qualité en lien avec la notion de menace ou santé des sols

Le concept de menace sur les sols est relativement ancien et vise à préserver les sols de différentes formes de dégradation. Dès 2002, la Commission de la Communauté européenne identifiait les principales menaces affectant les sols (CEC, 2002). Certaines d'entre elles ont fait l'objet d'une évaluation nationale au niveau français comme Roger-Estrade *et al.* (2011) pour le risque de tassement, ou Daroussin *et al.* (2019) pour le risque d'érosion. Les indicateurs liés aux menaces sur les sols, s'ils subsistent, sont progressivement associés, voire remplacés, par des indicateurs liés aux fonctions ou services rendus par les sols développés ci-dessus.

Le concept de santé des sols est apparu plus récemment dans la littérature scientifique. Doran et Zeiss (2000) définissent la santé des sols comme « la capacité d'un sol à fonctionner comme un système vivant essentiel pour soutenir la productivité des plantes et des animaux, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air et promouvoir la santé des plantes et des animaux, dans les limites de l'écosystème et de l'utilisation des terres », mettant l'accent sur la biologie des sols dans le concept de santé des sols. Il est désormais présent dans les textes des politiques publiques. Ainsi, dans le plan d'implémentation européen du pacte pour des sols sains en Europe (publié en septembre 2021), la santé des sols est définie comme « la capacité continue des sols à soutenir les services écosystémiques ». Presque au même moment, la loi française « Climat et Résilience » définissait l'artificialisation des sols comme « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage ».

Si les concepts de qualité et de santé des sols peuvent avoir des définitions spécifiques, les différences entre ces concepts sont ténues, dépendantes des communautés de recherche et de développement. Ils se réfèrent de manière commune aux services écosystémiques associés aux sols ou aux fonctions des sols. Le terme de santé des sols est de plus en plus utilisé, parce qu'il est parlant pour le grand public, qu'il semble pertinent pour certains agriculteurs (Richelle, 2019), et qu'il fait écho à un courant actuel autour du concept de « une seule santé » (santé des hommes, des animaux, et de l'environnement, y compris les sols). C'est ainsi que le *Soil Mission Board* mis en place à l'échelle européenne l'a adopté (*"Healthy soils"* à l'horizon 2030). Certains auteurs proposent désormais de réserver le terme « qualité » aux propriétés inhérentes d'un sol, et le terme « santé » aux évaluations des propriétés dynamiques affectées par la gestion du sol (Moebius-Clune *et al.*, 2016; Kibblewhite, 2018). De cette façon, les indicateurs de qualité refléteraient les propriétés intrinsèques d'un sol qui soutiennent les fonctions (écologiques), tandis que les indicateurs de santé représenteraient mieux la performance réelle de la fourniture de services (écosystémiques), dans une fourchette définie par la qualité.

VERS UN RÉFÉRENTIEL OPÉRATIONNEL D'INDICATEURS DE QUALITÉ DES SOLS

L'exemple des indicateurs de l'érosion hydrique des sols

Des travaux déjà anciens et constamment remis à jour ont permis de proposer des indicateurs de l'aléa 'érosion hydrique des sols', c'est-à-dire d'un potentiel de perte en sol. Les indicateurs relatifs à l'aléa érosion prennent en compte certaines propriétés des sols (texture, teneur en matières organiques, test de stabilité structurale...) selon la disponibilité des données, et des variables relatives à la couverture des sols, au climat et à la topographie. Ces indicateurs et les méthodes associées pour les calculer s'appuient sur des bases de données et des modèles différents selon l'échelle considérée. À l'échelle mondiale, on peut mentionner l'approche de l'USDA, et à l'échelle Européenne le modèle PESERA (Panagos *et al.*, 2020). À l'échelle nationale, le modèle MESALES a permis à INRAE de produire la première carte nationale de l'aléa érosion (Le Bissonnais *et al.*, 2002), mise à disposition par le GIS Sol, puis plus récemment la carte du service de contrôle de l'érosion (Daroussin *et al.*, 2019). À l'échelle régionale, on peut signaler un travail dans l'ex-région Languedoc-Roussillon en collaboration avec les chambres d'agriculture dans le cadre du GIS Sol et une initiative similaire en région Bretagne portée par l'Institut Agro (Colmar *et al.*, 2010), s'appuyant toutes les deux sur le modèle MESALES. Les indicateurs sont différents selon que l'on s'attache à un potentiel

de perte en sol, à une émission de particules de sol dans les cours d'eau qui fait intervenir des notions de connectivité hydraulique, à des pertes réelles en sol qui mobilisent des observations et/ou des modèles sur différents pas de temps, ou bien encore à la prévention des risques de mouvement de terrain. Dans tous ces cas, des propriétés des sols sont utilisées, mais ce ne sont pas les mêmes données ou les mêmes bases de données qui sont mobilisées, car les échelles varient, et elles ne sont pas combinées avec les mêmes données de l'environnement (climat, usages des sols...). La démarche de validation peut varier aussi, voire être associée à un dire d'experts, comme c'est par exemple le cas en Bretagne (Colmar *et al.*, 2010). Cet exemple illustre la multiplicité des questions autour du même enjeu, celui de l'érosion hydrique, puis de la multiplicité des modèles et bases de données mobilisées qu'appellent ces questions, selon les échelles et les contextes d'application.

Vers un référentiel d'indicateurs opérationnels

Le ministère en charge de l'agriculture a proposé en 2017 un « Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols ». Plus récemment, l'ADEME a engagé un travail conséquent sur l'inventaire des indicateurs de qualité des sols et des cadres dans lesquels ils pourraient être utilisés (Calvaruso *et al.*, 2019). L'Agence a aussi mis en place une animation autour des nombreux projets de recherche sur les indicateurs des fonctions et services des sols, pour favoriser une convergence des approches et une offre pour les gestionnaires. INRAE a engagé des travaux de recherche pour qualifier les sols depuis plusieurs dizaines d'années, mobilisant depuis 2010 le cadre conceptuel des services écosystémiques. Différents projets, à différentes échelles et dans différents contextes, ont porté sur la caractérisation des états et des menaces et, plus récemment, des fonctions et services des sols (sans être exhaustif, on peut citer les projets européens Landmark, puis plus récemment SIREN et PREPSOIL, le projet ANR Soilserv, les projets du Cerema MUSE et DESTISOL, l'étude INRAE EFES-EA (Tibi et Thérond, 2017)). Ces travaux ont fait l'objet de nombreuses publications et d'applications avec des partenaires (conseils régionaux, métropoles, etc.).

Le GIS Sol a lui-même soutenu depuis quelques années la construction et le déploiement d'indicateurs de certaines fonctions des sols, à partir de mesures et d'observations réalisées sur différentes propriétés des sols (concentrations en contaminants, nutriments, carbone organique, pH), de la végétation et du milieu (géologie, topographie) (Antoni *et al.*, 2011). Des travaux ont été développés sur des indicateurs comme l'aléa érosion, le réservoir en eau utilisable ou la biodiversité des sols.

Tous ces projets montrent que l'agrégation de propriétés des sols demande une expertise importante sur les

modèles ainsi que sur les bases de données à mobiliser. Les bases scientifiques, la cohérence des modèles et des données associées, la transparence de la méthodologie, la compréhension des fondements et l'opérationnalité de la mise en œuvre sont des critères importants pour développer ces indicateurs. Ces derniers commencent à intégrer de mieux en mieux les incertitudes, ce qui constitue encore un champ de recherche (Benke *et al.*, 2022 ; Robinson *et al.*, 2018 ; Wesseling *et al.*, 2020).

Une première réflexion a été développée dans le cadre des instances du GIS Sol et la coordination d'une étude a été confiée à la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE) d'INRAE, pour développer un référentiel en appui aux politiques publiques jugées par les financeurs de l'étude (ministères en charge de l'écologie et de l'agriculture, ADEME et OFB) comme prioritaires. Les grandes lignes du cahier des charges sont les suivantes : faire l'inventaire et l'analyse des politiques publiques ayant trait à la protection des sols et/ou susceptibles d'avoir des impacts indirects sur les sols et des productions scientifiques pouvant éclairer ces politiques publiques ; identifier les indicateurs disponibles, les lacunes et les besoins sur quelques thématiques prioritaires ; produire un référentiel d'indicateurs sur ces thématiques, tant en termes d'objectif des indicateurs thématiques que d'échelles ; déployer de manière opérationnelle quelques indicateurs. Cette élaboration d'un cadre de référence opérationnel d'indicateurs de qualité de sols ne s'inscrit pas dans une approche normative ; bien au contraire, elle devra constituer une aide au choix des modèles et des données en s'appuyant sur des exemples d'utilisation, illustrant les atouts et les limites des approches utilisées. Cette étude a été lancée en 2022 et sera rendue courant 2024.

CONCLUSIONS

En raison de leur importance pour l'Homme et la Terre ainsi que des pressions sans précédents qui s'exercent sur eux, les sols sont de mieux en mieux intégrés dans les politiques publiques internationales, européennes, nationales et territoriales. Au niveau européen, cette intégration peut se faire comme proposé dans le plan de mise en œuvre de la Mission « Un pacte pour des sols sains en Europe » en combinant quatre types d'actions : (i) le renforcement des compétences et des connaissances pour la gestion des sols, (ii) la cocréation et la valorisation d'innovations locales pour améliorer la santé des sols partout, (iii) le développement de la surveillance des sols, et (iv) des interactions accrues avec la communauté des utilisateurs des sols et la société dans son ensemble.

Cette stratégie va de pair avec un besoin récurrent et très large d'indicateurs de qualité et/ou de santé des sols, ces deux concepts devant être considérés comme proches et liés au souci

de mieux communiquer sur les sols auprès de la société. Au vu du foisonnement actuel d'initiatives issues d'acteurs très divers dans le domaine du suivi de la santé des sols, et en prévision d'une probable stratégie globale prochaine à l'échelle de l'Union européenne pour la protection et l'utilisation durable des sols, voire pour la restauration des sols dégradés, il est nécessaire de fiabiliser les indicateurs et leur mode d'interprétation et d'aller dans la mesure du possible vers une harmonisation des propositions.

Le GIS Sol peut et doit jouer un rôle de référent dans l'inventaire, le partage d'informations, et pour partie la production opérationnelle d'indicateurs. Le défi pour le GIS Sol est triple : (i) passer d'une offre de données sur les propriétés morphologiques, physiques, chimiques et biologiques des sols à une offre de données sur des indicateurs de fonctions et de services des sols ; (ii) passer d'une offre de données à un référentiel de modèles, à mettre en œuvre pour estimer ces indicateurs, et à un cadre d'aide et d'interprétation à leur usage ; et (iii) proposer une offre plus opérationnelle et plus adaptée aux contextes territoriaux d'application pour le développement de ces indicateurs. Cette trajectoire répond à la demande sociétale. Elle impliquera la collaboration avec de nombreux acteurs (élus et services de l'État aux échelles nationale, territoriale et locale ; propriétaires, gestionnaires et exploitants de sols ; ONG diverses), ce dont le GIS Sol a l'expérience et le savoir-faire.

BIBLIOGRAPHIE

- Adhikari K., Hartemink A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, 101-111. (<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>).
- Alliance Environnement (2020). Étude de soutien à l'évaluation de l'impact de la PAC sur la gestion durable des sols ; Résumé exécutif. 16 pp. (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bb039be3-6698-11eb-aeb5-01aa75ed71a1/language-fr>).
- Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A. (2004). The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1945-1962.
- Bach E.M., Ramirez K.S., Fraser T.D., Wall D.H. (2020). Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future. *Sustainability*, 12, 2662. (<https://doi.org/10.3390/su12072662>).
- Bailey V.L., Bond-Lamberty B., DeAngelis K., Grandy A.S., Hawkes C.V., Heckman K., Lajtha K., Phillips R.P., Sulman B.N., Todd-Brown K.E.O., Wallenstein M.D. (2018). Soil carbon cycling proxies: Understanding their critical role in predicting climate change feedbacks. *Global Change Biology*, 24, 895-905. (DOI:10.1111/gcb.13926).
- Bellec P., Lavarde P., Lefebvre L., Madignier M.L. (2015). Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols. Rapport CGEDD n°010068-01 et CGAAER n°14135 (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie et Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt), 136 pp.
- Benke K., Robinson N., Norrg S., Rees D., O'Leary G. (2022). Epistemic uncertainties in the assessment of regional soil acidification. *Environments*, 9, 97. (<https://doi.org/10.3390/environments9080097>).
- Bertrand M. (2018). La protection des sols dans le cadre de l'Union européenne.

- Sciences de l'Homme et Société. Université Lyon 3 J. Moulin, 2018. ffilet-02573013 (<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02573013/document>).
- Billet P. (2017). De la source au puits : aspects juridiques de la protection des sols dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. *Revue Juridique de l'Environnement*, HS17, 215-227. (<https://www.cairn.info/revue-juridique-de-l-environnement-2017-HS17-page-215.htm>).
- Billet P. (2018). The land's legal status pertaining to human uses: An inventory and prospects. *Annales des Mines-Responsabilité et Environnement*, 91, 24-28.
- Blanchart A., Sere G., Cherel J., Warot G., Stas M., Consales J.N., Schwartz C. (2017). Contribution des sols à la production de services écosystémiques en milieu urbain – une revue. *Environnement Urbain / Urban Environment*, 11 (<http://journals.openedition.org/eue/1809>).
- Boer B.W., Ginzky H., Heuser I.L. (2017). International soil protection law: history, concepts and latest developments. In: Ginzky H., Heuser I., Qin T., Ruppel O., Wegerdt P. (Eds.) *International Yearbook of Soil Law and Policy* 2016. Springer, Cham (https://doi.org/10.1007/978-3-319-42508-5_7).
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Flesskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Willem van Groenigen J., Brussaard L. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- Calvaruso C., Blanchart A., Bertin S. (2019). Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégies de déploiement. 80 pp.
- Calzolari C., Ungaro F., Filippi N., Guermandi M., Malucelli F., Marchi N., Staffilani F., Tarocco P. (2016). A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geoderma*, 261, 190-203. (<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.030>).
- CCE - Conseil des Communautés européennes (1986). Directive 86/278/CEE du Conseil du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture. *Journal Officiel des Communautés Européennes*, 181, 6-12 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278&from=FR>).
- CCE - Conseil des Communautés européennes (1991). Directive 91/676/CEE du Conseil du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. *Journal Officiel des Communautés Européennes*, 375, 1-8 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:31991L0676>).
- CCE - Conseil des Communautés européennes (2006). Proposition de Directive du parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE (présentée le 22.9.2006 par la Commission). COM (2006) 232 final. 31 p. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006PC0232&from=FR>).
- CE - Conseil de l'Europe (1972). Charte européenne des sols. Conseil de l'Europe, Strasbourg, août 1972. *Revue Juridique de l'Environnement*, n°3-4, 1976. Travaux du premier Congrès de la SFDE (Strasbourg, les 6, 7 et 8 mai 1975), 421-424. (https://www.persee.fr/doc/rjenv_0397-0299_1976_num_1_3_1185).
- CE - Commission Européenne (2006a). Soil protection—the story behind the strategy. 26 pp. (<https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/soillight.pdf>).
- CE - Commission Européenne (2006b). Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE, COM (2006) 232 final, Bruxelles, 25 septembre 2006.
- CE - Commission Européenne (2012). Rapport de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions ; Mise en œuvre de la stratégie thématique en faveur de la protection des sols et activités en cours. 17 pp. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0046&from=EN>).
- CEC - Commission of the European Communities (2002). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the economic and social committee and the Committee of the Regions; Towards a Thematic Strategy for Soil Protection. 35 pp. (Brussels, 16.4.2002, COM(2002) 179 final). (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52002DC0179&from=EN>).
- Chen Y. (2019). Withdrawal of European Soil Framework Directive: Reasons and recommendations. *Journal of Sustainable Development*, 13, 1. (DOI:10.5539/jsd.v13n1p1).
- CMCE - Comité des Ministres du Conseil de l'Europe (1972). Charte européenne des sols. Résolution (72)19 adoptée le 30 mai 1972 lors de la 211e réunion des Délégués des Ministres. 5 pp. (<https://rm.coe.int/CoERMPublicCommonSearchServices/DisplayDCTMContent?documentId=09000016804e57ea>).
- Colmar A., Walter C., Le Bissonnais Y., Daroussin J. (2010). Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif. *Etude et gestion des sols*, 17, 19-32.
- Cuyppers S., Randier C. (2009). L'application juridique de la convention sur la protection des Alpes : la situation en Allemagne, Autriche, France, Italie et Slovénie. *Revue Européenne de Droit de l'Environnement*, 13, 3-32.
- Daroussin J., Cousin I., Tibi A., Le Bissonnais Y., Girardin A., Meillet A., Choler P., Therond O. (2019). Evaluating the "Soil stabilisation and control of erosion" ecosystem service provided by agricultural ecosystems over the French territory. *Global Symposium on Soil Erosion, FAO Conference* (<https://www.fao.org/3/ca5582en/CA5582EN.pdf>).
- Degron R. (2020). Les Objectifs de développement durable 2015-2030 : Un cadre international d'actions sous forte contrainte financière. *Gestion & Finances Publiques*, 3, 72-82. (DOI:10.3166/gfp.2020.3.009).
- Demestihis C., Plénet D., Génard M., Garcia de Cortazar-Atauri I., Launay M., Ripoché D., Beaudoin N., Simon S., Charreyron M., Raynal C., Lescourret F. (2018). Analyzing ecosystem services in apple orchards using the STICS model. *European Journal of Agronomy*, 94, 108-119. (<https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.01.009>).
- Dey S., Bhattacharyya R. (2019). The mycorrhizosphere effect on pedogenesis and terrestrial biomes. In : Varma A, Choudhary D.K. (Eds.) *Mycorrhizosphere and Pedogenesis*, pp. 275-296. Springer, Singapore.
- Desrousseaux M., Schmitt B., Billet P., Béchet B., Bissonnais Y.L., Ruas A. (2019). Artificialised land and land take: What policies will limit its expansion and/or reduce its impacts? In Ginzky H., Dooley E., Heuser I.L., Kasimbazi E., Markus T., Qin T. (Eds.) *International Yearbook of Soil Law and Policy* 2018, pp. 149-165. Springer, Cham.
- Destoumieux-Garzón D., Mavingui P., Boetsch G., Boissier J., Darriet F., Duboz P., Fritsch C., Giraudoux P., Le Roux F., Morand S., Paillard C., Pontier D., Sueur C., Voituren Y. (2018). The One Health concept: 10 years old and a long road ahead. *Frontiers in Veterinary Sciences*, 5, 14. (DOI:10.3389/fvets.2018.00014).
- Diaz-Gonzalez F.A., Vuelvas J., Correa C.A., Vallejo V.A., Patino D. (2022). Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators – Review. *Ecological Indicators*, 135, 108517. (<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108517>).
- Dominati E., Patterson M., Mackay A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69, 1858-1868.
- Doran J.W., Parkin T.B. (1997). Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. In: Doran J.W., Jones A.J., *Methods for Assessing Soil Quality*, Soil Science Society of America Special Publications 49, pp. 25-37.
- Doran J.W., Zeiss M.R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3-11.
- Drobnik T., Greiner L., Keller A., Grêt-Regamey A. (2018). Soil quality indicators - From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94(1), 151-169. (<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>).
- Ellili-Bargaoui Y., Walter C., Lemerrier B., Michot D. (2021). Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field

- measurement of soil properties. *Ecological Indicators*, 121, 107211. (<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107211>).
- FAO (1981). World soil charter, 8 pp.
- FAO (2015). Charte mondiale des sols révisée. (juin 2015), 12 pp.
- FAO (2021). L'État des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde - Des systèmes au bord de la rupture. Rapport de synthèse 2021. Rome. 93 pp. (<https://doi.org/10.4060/cb7654fr>)
- Fossey M., Angers D., Bustany C., Cudennec C., Durand P., Gascuel-Oudou C., Jaffrezic A., Pérès G., Besse C., Walter C. (2020). A framework to consider soil ecosystem services in territorial planning. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 28. (<https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00028>).
- Ganugi P., Masoni A., Pietramellara G., Benedettelli S. (2019). A review of studies from the last twenty years on plant–arbuscular mycorrhizal fungi associations and their uses for wheat crops. *Agronomy*, 9, 840.
- Gavrilescu M. (2021). Water, soil, and plants interactions in a threatened environment. *Water*, 13, 2746. (<https://doi.org/10.3390/w13192746>).
- GIS Sol. (2011). Synthèse sur l'état des sols de France. Paris, FRA : Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols. 28 pp.
- Gitton C., Fallon G. (2020). Étude de parangonnage sur les dispositifs d'information concernant la qualité des sols agricoles. Rapport CGEDD 013156-01 et CGAAER n° 19104, 92 pp.
- Grubb M., Koch M., Thomson K., Sullivan F., Munson A. (2019). The 'Earth Summit' Agreements: A Guide and Assessment. An Analysis of the Rio '92 UN Conference on Environment and Development. Routledge Library Editions: Environmental Policy, 202 pp.
- Heinen R., Biere A., Harvey J.A., Bezemer T.M. (2018). Effects of soil organisms on aboveground plant-insect interactions in the field: Patterns, mechanisms and the role of methodology. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6, 106. (<https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00106>).
- IPBES (2018). The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia. Rounsevell, M., Fischer, M., Torre-Marín Rando, A. and Mader, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 894 pp.
- Jourda G., Pellevat C. (2021). Proposition de résolution en application de l'article 73 quinquies du Règlement, demandant la relance du processus d'élaboration d'une directive européenne sur la protection des sols et la prévention de leur dégradation par les activités industrielles et minières. 35 p. Rapport n°698 (2020-2021) déposé le 17 juin 2021. (<http://www.senat.fr/rap/120-698/120-698.html>).
- Kibblewhite M.G. (2018). Soil and soil health: an overview (evolution and definitions of soil health concepts). In: Reicosky D. (Ed.), *Managing Soil Health for Sustainable Agriculture*. Volume 1: Fundamentals. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, 14 pp.
- Kuzyakov Y., Gunina A., Zamanian K., Tian J., Luo Y., Xu X.L., Yudina A., Aponte H., Alharbi H., Ovsepyan L., Kurganova I., Ge T.D., Guillaume T. (2020). New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7, 282-288. (<https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020338>).
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King D. (2002). Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46, 207-220.
- Lima A.C.R., Brussaard L., Totola M.R., Hoogmoed W.B., de Goede R.G.M. (2013). A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. *Applied Soil Ecology*, 64, 194-200. (<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.009>).
- Maréchal A., Jones A., Panagos P., Belitrandi D., De Medici D., De Rosa D., Martin Jimenez J., Koeninger J., Labouyrie M., Liakos L., Lugato E., Matthews F., Montanarella L., Muntwyler A., Orgiazzi A., Scarpa S., Schillaci C., Wojda P., Van Liedekerke M., Simoes Vieira D. (2022). EU Soil Observatory 2021, EUR 31152 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, DOI:10.2760/582573.
- Martin E., Bispo A., Chenu C., Corson M.S., Keller C., Podesta G., Robert S., Sapjanskas J. (2016). Des outils intégrés d'aide à la décision pour une meilleure gestion des sols. In: Bispo A., Guellier C., Martin E., Sapjanskas J., Soubelet H., Chenu C. (Coord.) *Les sols. Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable*, Quae, pp.285-310.
- McBratney A., Field D.J., Koch A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213. (<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>).
- McBratney A.B., Minasny B., Wheeler I., Malone B.P. (2012). Frameworks for digital soil assessment. In: Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B. (Eds.), *Digital Soil Assessment and Beyond*. Taylor & Francis Group, London, pp. 9-14.
- Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Ristow A.J., van Es H.M., Thies J.E., Shaylor H.A., McBride M.B., Kurtz K.S.M., Wolfe D.W., Abawi G.S. (2016). Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY, 123 pp.
- Morand S., Guégan J.-F., Laurans Y. (2020). De *One Health* à *Ecohealth*, cartographie du chantier inachevé de l'intégration des santé humaine, animale et environnementale. *Iddri, Décryptage* n°04/20.
- Obiang Ndong G., Villerd J., Cousin I., Therond O. (2021). Using a multivariate regression tree to analyze trade-offs between ecosystem services: Application to the main cropping area in France. *Science of the Total Environment*, 764, 142815. (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142815>).
- Obst C.G. (2015). Reflections on natural capital accounting at the national level: Advances in the system of environmental-economic accounting. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 6, 315-339. (DOI:10.1108/SAMPJ-04-2014-0020).
- OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (2001). Environmental indicators for agriculture; Methods and results. Executive Summary. OECD Publications, Paris (France).
- ONU. (2016). Cadre central du Système de comptabilité économique et environnementale, 2012. 377 pp. (https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seearev/cf_trans/seea_cf_final_fr.pdf).
- Panagos P., Montanarella L., Barbero M., Schneegans A., Aguglia L., Jones A. (2022). Soil priorities in the European Union. *Geoderma Regional*, e00510.
- Panagos P., Ballabio C., Poesen J., Lugato E., Scarpa S., Montanarella L., Borrelli P. (2020). A soil erosion indicator for supporting agricultural, environmental and climate policies in the European Union. *Remote Sensing* 12, 1365 (<https://doi.org/10.3390/rs12091365>).
- Parson E.A., Haas P.M., Levy M.A. (1992). A summary of the major documents signed at the Earth Summit and the Global Forum. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 34, 12-36. (<https://doi.org/10.1080/00139157.1992.9931468>).
- Pedersen J.S.T., Santos F.D., van Vuuren D., Gupta J., Coelho R.E., Aparicio B.A., Swart R. (2021). An assessment of the performance of scenarios against historical global emissions for IPCC reports. *Global Environmental Change*, 66, 102199. (<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102199>).
- Pellerin S., Bamière L., Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Bellassen V., Cardinaël R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Darroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A.I., Guenet B., Houot S., Klumpp K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri S., Mézière D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Théron O., Viaud V., Grateau R., Le Perchec S., Savini I., Réchauchère O. (2020). Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Rapport scientifique de l'étude. Étude réalisée pour l'ADEME et le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. INRA, 528 pp. hal-03163517.
- Richelle L. (2019). De la fertilité des sols à la santé de la terre. Retour sur un processus d'apprentissage collectif visant l'évaluation de la santé des sols cultivés en agriculture paysanne. Thèse de l'Université de Namur, 639 pp.

- Robinson N., Norrg S., Rees D.B., Benke K.K., Davey M. (2018). Assessment of error sources in measurements of field pH: effect of operator experience, test kit differences, and time-of-day. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49, 269-285. (DOI:10.1080/00103624.2017.1395442).
- Roger-Estrade J., Adamiade V., Arrouays D., Baranger E., Bartoli M., Boizard H., Brêthes A., Brisson N., Capowiez Y., Chanzy A., Chaplain V., Cousin I., Cosenza P., Cui K., Cui Y.J., Debuissou D., Défossez P., Gérard F., Jayet P.A., Labreuche J., Le Bas C., Lefèvre Y., Léonard J., Lévêque E., Lévêque F., Mary B., Mumen M., Ranger J., Tabbagh A., Tabbagh J., Tang A.M., Tessier D., Richard G. (2011). Dégénération physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : principaux résultats du projet GESSOL-ADD DST. *Etude et Gestion des Sols*, 18, 187-199.
- Smith P., Cotrufo M.F., Rumpel C., Paustian K., Kuikman P.J., Elliott J.A., McDowell R., Griffiths R.I., Asakawa S., Bustamante M., House J.I., Sobocká J., Harper R., Pan G., West P.C., Gerber J.S., Clark J.M., Adhya T., Scholes R.J., Scholes M.C. (2015). Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *Soil*, 1, 665-685. (<https://doi.org/10.5194/soil-1-665-2015>).
- Tibi A., Théron O. (2017). Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFES. Synthèse du rapport d'étude, Inra (France), 118 pp.
- Tóth Z. (2018). International dimensions of EU soil policy—the main binding and non-binding legal instruments. *Hungarian Journal of Legal Studies*, 59, 290-303. (DOI:10.1556/2052.2018.59.3.4).
- UNEP (2016). Unlocking the Sustainable Potential of Land Resources: Evaluation Systems, Strategies and Tools. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel. Herrick J.E., Arnalds O., Bestelmeyer B., Bringezu S., Han G., Johnson M.V., Kimiti D., Yihe Lu, Montanarella L., Pengue W., Toth G., Tukahirwa J., Velayutham M., Zhang L., 89 pp.
- Vaillancourt J.G. (2002). Action 21 et le développement durable. *Vertigo* la revue électronique en sciences de l'environnement, 3 (<https://doi.org/10.4000/vertigo.4172>).
- Veerman C., Correia T.P., Bastioli C., Biro B., Bouma J., Cienciala E., Emmett B., Frison E.A., Grand A., Filchew L.H., Kriaučiūnienė Z., Pogrzeba M., Soussana J.-F., Vela Olmo C., Wittkowski R. (2020). Caring for soil is caring for life: ensure 75% of soils are healthy by 2030 for healthy food, people, nature and climate: interim report of the mission board for soil health and food, 52 pp. (https://ec.europa.eu/info/publications/caring-soil-caring-life_en).
- Verboom W.H., Pate J.S. (2013). Exploring the biological dimension to pedogenesis with emphasis on the ecosystems, soils and landscapes of southwestern Australia. *Geoderma*, 211, 154-183. (10.1016/j.geoderma.2012.03.030).
- Verheijen F.G.A., Jones R.J.A., Rickson R.J., Smith C.J. (2009). Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94, 23-38.
- Wesseling J., Kroes J., Campos Oliveira T., Damiano F. (2020). The impact of sensitivity and uncertainty of soil physical parameters on the terms of the water balance: Some case studies with default R packages. Part I: Theory, methods and case descriptions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105054. (<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105054>).
- Yang R.-M., Minasny B., Ma Y.-X., Field D., McBratney A., Wu C.-F. (2018). A preliminary soil security assessment of agricultural land in middle-eastern China. *Soil Use and Management*, 34, 584-596 (<https://doi.org/10.1111/sum.12463>).
- Young I.M., Blanchart E., Chenu C., Dangerfield M., Fragoso C., Grimaldi M., Ingram J., Monrozier L.J. (1998). The interaction of soil biota and soil

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

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

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

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

* Auteur correspondant : chantal.gascuel@inrae.fr

RÉSUMÉ

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

Comment citer cet article :

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

Comment télécharger cet article :

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

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

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

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

Mots-clés

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

SUMMARY

PERSPECTIVE FOR SOIL INVENTORY AND MONITORING IN FRANCE:

Which data are needed? How better to acquire them, to diffuse and use them?

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

Key-words

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

RESUMEN

¿QUÉ PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS Y TÉCNICAS PARA EL INVENTARIO Y LA VIGILANCIA DE LOS SUELOS EN FRANCIA:

Qué necesidades de datos, cómo adquirirlos mejor, difundirlos, utilizarlos?

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

PALABRAS CLAVE

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

Acronymes et abréviations

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

1. INTRODUCTION

En France, l'inventaire et la surveillance des sols sont assurés par une structure nationale assez originale en Europe et dans le monde, le GIS Sol (Arrouays *et al.*, 2022). Cette structure partenariale permet de fédérer à l'échelle nationale des actions harmonisées d'acquisition, de diffusion et de valorisation des données sur les sols, en co-construisant un programme qui associe les pouvoirs publics, les instituts de recherche et de développement, les agences à vocation de gestion de l'environnement et des territoires, les utilisateurs des données. L'échelle privilégiée est celle du territoire¹ ou de la France entière.

La convention-cadre la plus récente qui régit le GIS Sol (2019) définit ainsi ses missions : « (i) concevoir, orienter, coordonner et assurer... des actions d'inventaire des sols et de suivi de leur qualité, notamment par le déploiement d'indicateurs, (ii) mettre en place, développer et gérer un système d'information sur les sols et les services écosystémiques auxquels ils participent pour répondre aux demandes des pouvoirs publics et de la société et contribuer à l'expertise, notamment dans le domaine des risques, (iii) faciliter la concertation et la coopération entre ses membres autour de l'information sur les sols pour favoriser l'interopérabilité avec d'autres systèmes d'information et valoriser davantage ses données pour aider à leur appropriation et à leur réutilisation, et (iv) harmoniser et coordonner les programmes nationaux avec les programmes européens ou internationaux de même nature ». De par les informations multiples qu'il produit et met à disposition, le GIS Sol constitue ainsi une structure stratégique pour accompagner l'élaboration et la mise en œuvre

des politiques publiques en lien avec les questions agricoles et environnementales. Les données issues des programmes qu'il pilote sont ainsi mobilisées pour répondre aux demandes des pouvoirs publics et de la société, tout en s'appuyant sur les acquis les plus récents de la recherche.

La journée des 20 ans du GIS Sol, qui s'est tenue le 6 décembre 2021², a été l'occasion de dresser un bilan de son action. Elle a permis également d'écouter les besoins des acteurs en matière d'acquisition et d'utilisation de données sur les sols. Le rôle clé du GIS Sol et la nécessité de sa pérennisation pour une meilleure connaissance des sols ont été réaffirmés. Le GIS Sol a par exemple joué un rôle dans l'émergence d'initiatives de l'Union européenne ou des Nations Unies (European Soil Data Centre, Panagos *et al.*, 2012 ; Partenariat mondial sur les sols de la FAO, lancé en 2012, <https://www.fao.org/global-soil-partnership/partners/fr/>). Pour autant, de nombreux pays ou continents considèrent que l'information sur les sols est encore trop fragmentée pour qu'une gouvernance globale puisse se mettre facilement en place à cette échelle (*e.g.* Montanarella et Vargas, 2012 ; Ortiz Garcia *et al.*, 2022).

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

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

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

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

Cet article a pour objectif de partir d'un bilan de la connaissance des sols et du GIS Sol et de l'expression des besoins, pour proposer des pistes d'évolution du GIS Sol. Ces perspectives n'engagent pas le GIS Sol; elles ont vocation à l'aider dans ses réflexions, ses décisions étant du ressort de ses instances de gouvernance qui prennent en compte des considérations stratégiques et de moyens. Le bilan et l'expression de besoins sur la connaissance des sols sont basés sur: i) une enquête en ligne largement diffusée, entre septembre 2021 et février 2022 et qui a collecté 203 réponses; ii) une table ronde d'acteurs de la gestion des sols, auteurs de cet article, qui a eu lieu le 6 décembre 2021 lors de la journée consacrée aux 20 ans du GIS Sol et qui a rassemblé en mode virtuel 300 participants³. Ces deux contributions font l'objet des deux premières parties. La troisième partie esquisse des perspectives scientifiques et techniques pour l'inventaire et la surveillance des sols, qui découlent de cette journée et de l'état de l'art scientifique, ou de la réflexion de membres du GIS Sol.

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

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

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

Cette enquête a fait l'objet d'envois par courrier électronique, utilisant le réseau d'échange de l'Association française d'étude des sols (AFES), et d'envois ciblés groupés par les membres

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

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

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

Les résultats de l'enquête indiquent que les sources d'informations mobilisées par les répondants sont diverses (*Figure 1a*): le Géoportail (95 %) (par la carte des sols au 1/250000, fruit d'une collaboration entre les membres du GIS Sol, et du fait du lien qu'il permet aux données des partenaires locaux) (Messant *et al.*, 2021), le portail du GIS Sol (59 %) qui donne accès aux données de ses différents programmes, puis les portails d'INRAE, du BRGM, de l'AFES et de l'Ademe. Le portail du RMT Sols et Territoires n'est utilisé que par 22 % des répondants et ceux des Chambres d'agriculture par 19 %. Ces sources d'informations sont mobilisées différemment selon l'appartenance des répondants (*Figure 1*).

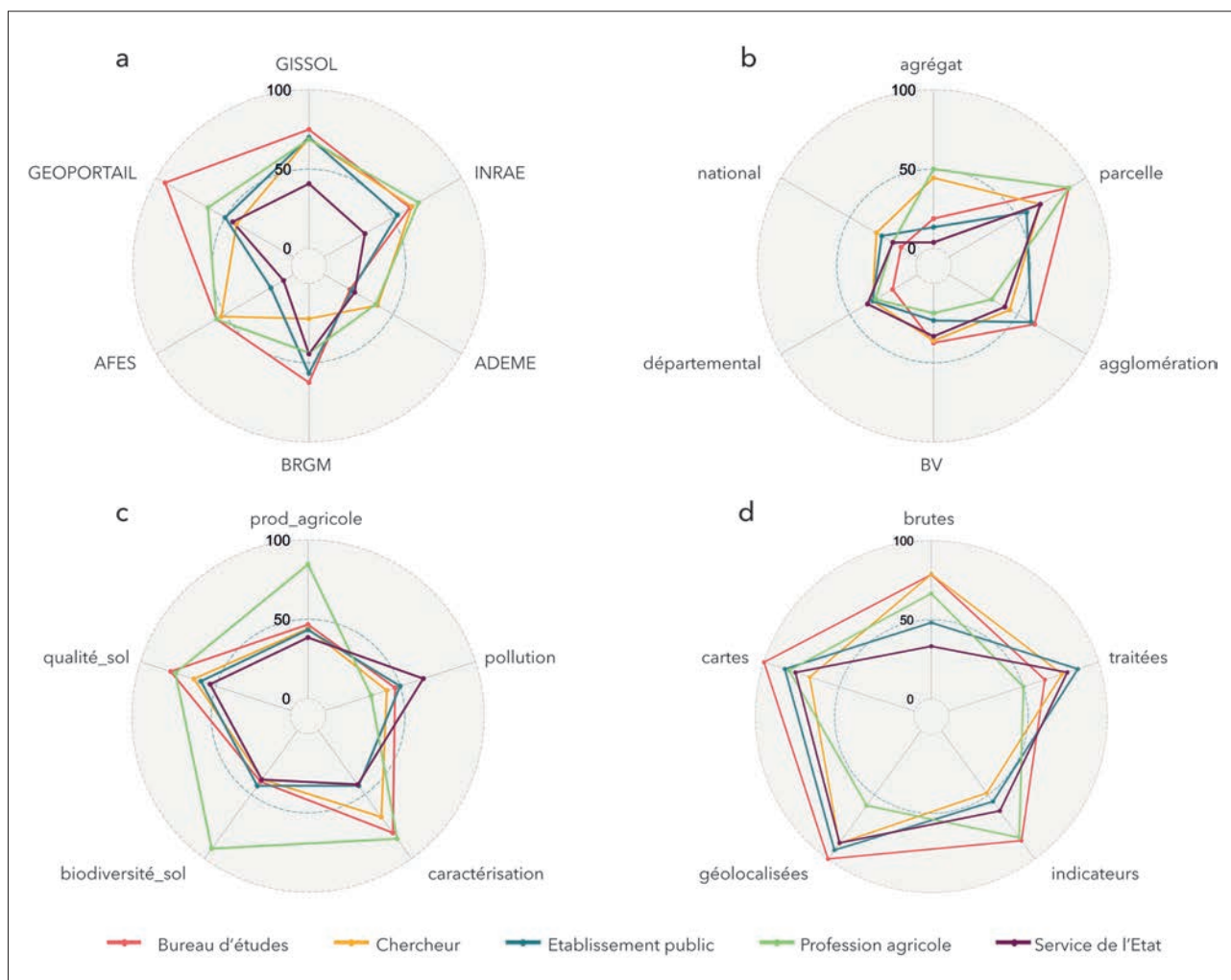
Dans une question à choix multiple possible, la moitié des répondants se dit intéressée spécifiquement par les sols agricoles. Viennent ensuite les sols urbains et péri-urbains, les sols des espaces naturels, les sols forestiers (chacun entre 20 et 25 %), et enfin les sols industriels (16 %). 40 % se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

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

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

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

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



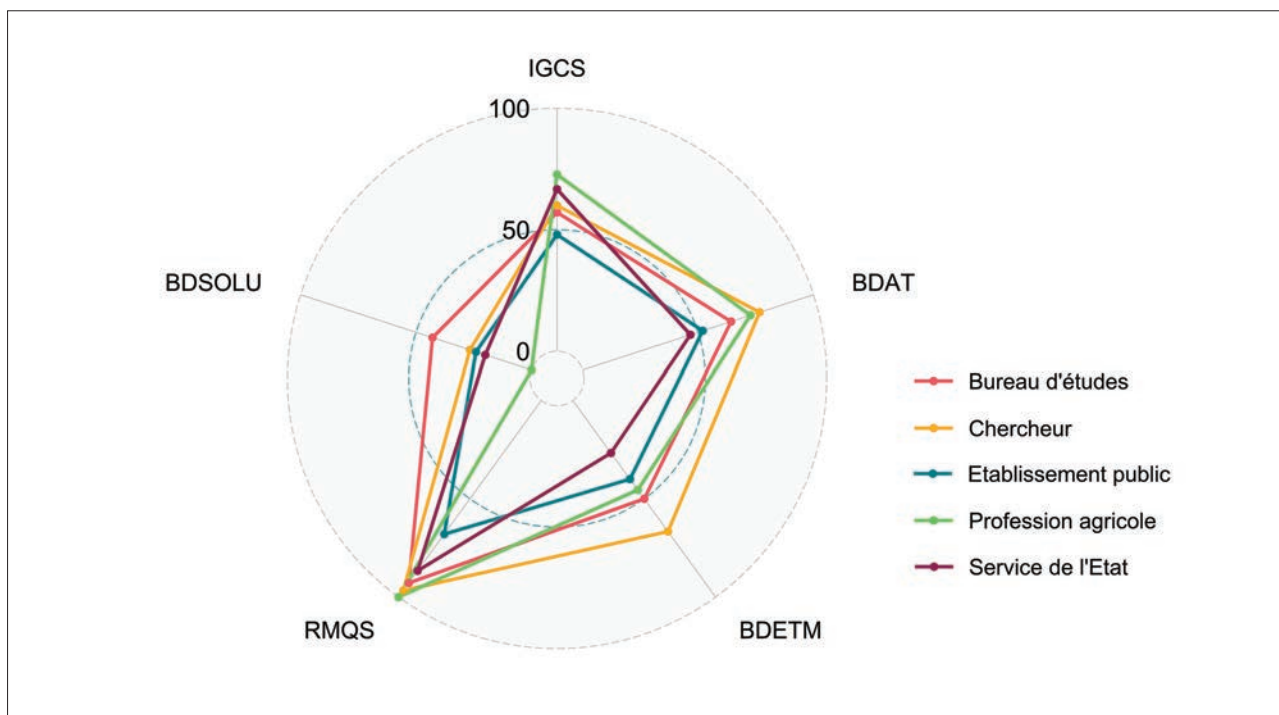
« agglomération » (48 %), ou comme « bassin-versant » (31 %). L'intérêt pour le niveau de l'agrégat est assez présent (23 %), comme l'est aussi le niveau national (19 %) (Figure 1b). Ces réponses indiquent donc des besoins à des niveaux d'organisation spatiale autres que ceux, nationaux ou régionaux,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

Les thématiques d'intérêt (Figure 1c) sont la « qualité des

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

Figure 2 - La connaissance des programmes du GIS Sol, selon les catégories de répondants.

Figure 2 - Knowledge of GIS Sol programs, according to the type of actors.



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

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

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

Les programmes relatifs au Réseau de Mesure de la Qualité des sols (RMQS), à l'Inventaire, la Gestion et la Conservation des Sols (IGCS), à la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) sont connus de plus de la moitié des répondants. Le RMQS est le programme le plus connu de chaque catégorie de répondants. La BDAT et l'IGCS sont moins connus mais restent à un niveau supérieur ou proche de 50 %. En revanche, la BDETM et la BDSolU sont moins connues. Ces faibles niveaux de visibilité ne sont pas surprenants, compte tenu de

l'arrêt temporaire de la collecte de la BDETM depuis 2009 et du lancement récent de la BDSolU qui ne concerne que les sols des milieux urbains. La BDETM est surtout connue des chercheurs tandis que la BDSolU l'est surtout des bureaux d'études. 41 % des répondants connaissent le conservatoire des sols. Ce dernier est surtout connu des bureaux d'études, des chercheurs et de la profession agricole.

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

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

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

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

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

Cette seconde partie synthétise les besoins exprimés lors d'une table ronde d'acteurs de la gestion des sols⁴, qui a eu lieu lors de la journée des 20 ans du GIS Sol, le 6 décembre 2021.

3.1. Des spécificités par type d'usage des sols

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

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

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

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

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

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

La télédétection constitue une de ces nouvelles sources d'information. Elle « a depuis longtemps contribué à la cartographie des sols qui est actuellement en plein renouveau, du fait d'instruments nouveaux », précise Emmanuelle Vaudour, enseignante-chercheuse à AgroParisTech, experte en télédétection et géographie des agroécosystèmes. Réaliser ou mettre à jour les cartes de propriétés des sols telles que celle du carbone organique du sol devient nécessaire pour faciliter leur gestion territoriale, en adéquation avec les politiques publiques qui visent à promouvoir le stockage de carbone du sol et en lien avec l'initiative internationale 4p1000 (<https://4p1000.org/>). Des approches fondées sur la proxi-détection ou la télédétection dans le domaine visible (Vis), proche infra-rouge (PIR) et moyen infra-rouge réflectif (MIR) (400-2500 nm) ont été mises au point, au moyen de spectroscopie de laboratoire (e.g., Barthès et Chotte, 2021), de capteurs aéroportés hyperspectraux (e.g., Gomez *et al.*, 2012) ainsi que, dans la dernière décennie, de divers capteurs satellitaires, à des niveaux d'organisation spatiale et pour des contextes géographiques variés (Vaudour *et al.*, 2022). Ces approches reposent sur l'identification de caractéristiques spectrales remarquables de plusieurs propriétés de sol, telles que la teneur en argile, en carbonate de calcium, en fer, en carbone organique, avec des pics spécifiques d'absorption, notamment dans le MIR (Vaudour et Girard, 2010 ; Barthès et Chotte, 2021).

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

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

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

Parmi les nouvelles sources d'information, le thème de la biologie des sols, de plus en plus présent dans les programmes du GIS Sol, mériterait également d'être développé ici. À titre d'exemple, soulignons l'acquisition de données de biologie des sols, dans le cadre d'une démarche de test sur le RMQS, le développement d'une chaîne d'analyse sur la biologie du sol et la construction d'indicateurs du fonctionnement biologique des sols en support au conseil agronomique⁵, qui pourraient permettre à terme d'élargir aux données de biologie des sols, le spectre des données fournies par la BDAT.

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

Antoine Illef, Chargé de projet Environnement et développement durable de la ville du Havre, souligne « l'importance de l'acquisition de données faite lors de travaux d'aménagement urbain ou lors de transactions immobilières », et propose de les partager avec le GIS Sol. Cette proposition mérite attention, d'autant plus que les métropoles acquièrent de plus en plus de données sur la pollution du sol, dans le cadre d'obligations à l'aménagement urbain. Mais c'est également le cas des forestiers qui relèvent des données pédologiques lors de diagnostics sylvo-climatiques, notamment lors du renouvellement des peuplements. Il est essentiel pour eux d'investir dans la connaissance des sols face aux contraintes du changement climatique. Il s'agit notamment, dans ces opérations, d'améliorer l'estimation du réservoir en eau utilisable, lequel permet, lorsqu'il est grand, d'atténuer les impacts de la variabilité climatique. En lien avec les nouvelles méthodes de récolte du bois énergie, des indicateurs de sensibilité des sols à une récolte accrue de biomasse ont été développés (projet INSENSE⁶). De

même, des données sur les sols agricoles sont acquises dans le cadre de projets de sciences et recherches participatives telles que l'OAB (Observatoire Agricole de la Biodiversité), l'OPVT (Observatoire participatif des Vers de Terre), le REVA (Réseau d'expérimentation et de veille à l'innovation agronomique) (Ranjard *et al.*, 2022).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

L'enjeu de santé recouvre des besoins de données très importants et extrêmement divers. Les sols peuvent avoir des effets sur la santé humaine, directement par ingestion de sol (par exemple par les enfants dans les cours d'école, les jardins...)

ou par inhalation suivie de déglutition pour les travailleurs agricoles, ou indirectement par absorption de contaminants par les plantes ou les animaux (y compris de virus entériques de l'homme). L'ingestion peut être, dans certaines situations, problématique (cas des animaux contaminés par le chlordécone⁷ par exemple), tout comme la voie indirecte par transfert vers la plante puis vers l'homme par l'alimentation humaine (cas du cadmium ou du mercure par exemple). L'exposition à la pollution des sols peut également intervenir par transfert vers d'autres milieux, comme l'eau ou l'air (produits médicamenteux, pesticides...) (Rai *et al.*, 2019). À cette complexité des voies d'exposition, s'ajoute l'immense variété des composés inclus naturellement dans la matrice sol, avec des degrés divers de disponibilité et biodisponibilité, dont la mesure n'est pas toujours scientifiquement établie (Froger *et al.*, 2021). Le besoin est donc large, que l'on considère les pressions liées aux activités humaines ou simplement les fonds pédo-biogéochimiques. Ceux-ci sont essentiels, car ils fournissent des références pour évaluer les impacts de pollutions ponctuelles accidentelles sur les sols.

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

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

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

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

la cartographie numérique des sols, amélioration progressive des connaissances des sols de France (polluants, carbone organique, biodiversité microbienne...), déploiement de tests divers. Des perspectives ont été émises pour chacun de ces programmes, s'appuyant sur les compétences du GIS Sol et sur les recommandations des évaluations scientifiques et politiques⁸. L'objectif de cette partie est d'esquisser des perspectives scientifiques et techniques plus générales, en lien avec les besoins exprimés par l'enquête et les divers acteurs de la gestion des sols, tout en intégrant l'état de l'art scientifique et les dynamiques impulsées par le GIS Sol lui-même.

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

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

Plusieurs facettes sont importantes à considérer. Tout d'abord, une prise de conscience politique tardive de l'importance des sols et de leur protection a sans doute contribué à un investissement qui n'était pas à la hauteur des enjeux futurs, malgré la constitution du GIS Sol. Il suffit de constater les impacts sur l'acquisition de données qu'ont eu certaines politiques européennes, comme, par exemple, le reclassement des zones défavorisées (<https://agriculture.gouv.fr/aides-aux-exploitations-classement-en-zone-defavorisee>) ou le lancement de l'étude BioSoil de l'Union Européenne (Lacarcé *et al.*, 2009) sur l'augmentation subite des budgets des programmes IGCS et RMQS, pour se rendre compte que, malgré une anticipation louable par la création du GIS Sol, les

politiques publiques européennes et nationales n'ont sans doute pas mesuré au départ l'importance des enjeux et des moyens à y consacrer. Mais le monde de la recherche n'a sans doute pas su alerter à temps les pouvoirs publics sur les enjeux associés à la fourniture d'informations adaptées et facilement compréhensibles pour un public non averti. La science du sol n'a pas communiqué de façon suffisante avec les pouvoirs publics et les citoyens pendant une période qui semble heureusement révolue. Elle a néanmoins rendu possible l'accès à des données dont le potentiel n'était pas au départ exploitable en masse, comme le permettent désormais certaines technologies à haut débit (microbiologie, télédétection, spectrométrie...), selon une tendance qui s'amplifiera avec les progrès des sciences et des technologies, des infrastructures de données.

Cette accélération de l'acquisition des données devra s'accompagner d'un travail auprès de toutes les parties prenantes pour que la pérennisation des données dans des bases de données soit, dans toutes les situations, explicitement prévue, financée, discutée avec le GIS Sol, pour adapter la capitalisation, la qualification, le traitement de données multiples et multiformes, au risque sinon de payer plusieurs fois de telles acquisitions, ou de perdre de l'information. *A minima*, si les données ne sont pas partagées et archivées, « bancarisées », il faudra porter à connaissance l'existence de travaux réalisés dans le système d'information prévu à cet effet, comme Refersols⁹. Trois exemples, à des stades de développement différents, peuvent être donnés à l'appui :

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

Si le premier exemple se fonde sur des méthodologies certifiées, les deux autres peuvent faire appel à des données

⁸ https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/cgaer_16080_2017_rapport.pdf

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

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

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

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

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

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

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

notamment aux échelles territoriales.

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

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

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

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

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

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

À partir de ces éléments, la proposition pourrait être de renforcer la place de la diffusion des données dans le Géoportail, en y portant à connaissance des travaux issus d'autres programmes du GIS Sol que la seule carte nationale des sols, et de travailler de manière plus étroite avec le RMT Sols et territoires, dont les travaux portent sur les niveaux d'organisation spatiale des territoires et de la parcelle, qu'ils soient mixtes, agricoles, forestiers ou urbains, et sur les impacts des modes de gestion des sols. Le besoin de communication, d'animation de réseaux d'acteurs autour de l'utilisation des données du GIS Sol a aussi été souligné et de véritables moyens dédiés à la communication, à la formation, à l'animation de réseaux d'acteurs pourraient être intégrés au GIS Sol, pour mieux diffuser les données et aider à leur utilisation. Le partage d'expériences d'utilisation des données, sur des cas concrets, à l'échelle locale, pourrait plus encore mettre en synergie des complémentarités de missions entre le GIS Sol, RNEST, le RMT Sols et Territoires, l'Afés, voire même AllEnvi¹⁰, ou les infrastructures de recherche (ANAE¹¹, OZCAR¹²...).

La dimension informatique d'une amplification de la dissémination d'information et de la communication, dans une visée d'open data, est importante et suppose d'associer des moyens pour favoriser l'utilisation des données, pour les intégrer dans des modèles, permettre le calcul d'indicateurs, traiter des données hétérogènes provenant des sciences et recherches participatives... Des compétences technologiques et d'ingénierie (interopérabilité, données FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability and Reusability, etc.)), une formation des acteurs en matière de pedométrie, de télédétection des sols et d'archivage de la donnée doivent être associées. On observe par ailleurs une montée en puissance d'autres

plateformes (data.gouv.fr, recherche.data.gouv.fr) qui modifient progressivement le paysage numérique et auxquelles il faudra s'articuler. L'interopérabilité doit être pensée comme un moyen d'améliorer la visibilité des données sur les sols par le plus grand nombre de plateformes.

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

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

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

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

5. CONCLUSION

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

¹⁰ ALLENI : Alliance nationale de recherche pour l'environnement

¹¹ ANAEE : <https://www.anaee-france.fr/>

¹² OZCAR : <https://www.ozcar-ri.org/fr/ozcar-observatoires-de-la-zone-critique-applications-et-recherche>

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

REMERCIEMENTS

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

BIBLIOGRAPHIE

- Adhikari K., Hartemink A.E. (2016). Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma*, 262, 101–111.
- Acocella V. (2015). Grand challenges in earth science: research toward a sustainable environment. *Front. Earth Sci.* 3 <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00068>.
- Amundson R. (2021). Factors of soil formation in the 21st century. *Geoderma* 391, 114960. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114960>.
- Arrouays D., McBratney A.B., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A.C., Morgan C., Roudier P., Poggio L., Mulder V.-L. (2020). Impressions of digital soil maps: the good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional*, 20, e00255.
- Arrouays D., Poggio L., Mulder V.-L., Salazar Guerrero O. (2021). Digital Soil Mapping and *GlobalSoilMap*— Scientific advances and the operational use of Digital Soil Mapping to address global environmental challenges. *Geoderma Regional*, 26, e00414.
- Arrouays D., Richer-de-Forges A.C., McBratney A. B., Hartemink A. E., Minasny B., Savin I., Grundy M., Leenaars J. G. B., Poggio L., Roudier P., Libohova Z., McKenzie N. J., van den Bosch H., B. Kempen, Mulder V. L., Lacoste M., Chen S., Saby N., Martin M., Roman Dobarco M., Cousin I., Loiseau T., Lehmann S., Caubet M., Lemerrier B., Walter C., Vaudour E., Gomez C., Martelet G., Krasilnikov P., Lagacherie P. (2018). The globalsoilmap project; past, present, future, and national examples from France. *Bulletin of Dokutchaev Soil Science Institute*, 95, 22 p. DOI : 10.19047/0136-1694-2018-95-3-23.
- Arrouays D., Stengel P., Feix I., Lesaffre B., Morard V., Bardy M., Bispo A., Laroche B., Caquet T., Juille F., Rabut M., Soussana J.-F., Voltz M., Gascuel-Odoux C. (2022). Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 365-379.
- Bispo A., Guellier C., Martin E., Sapjanskas J., Souvelet, H., Chenu C. (eds) (2016). Les sols. Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable. Collection Savoir-faire. Editions Quae, France. 304 p.
- Barthès B.G., Chotte J. (2021). Infrared spectroscopy approaches support soil organic carbon estimations to evaluate land degradation. *Land Degradation & Development* 32, 310–322. <https://doi.org/10.1002/ldr.3718>
- Bouma J. (2014). Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(2), 111–120.
- Castaldi F., Chabrilat S., Don A., van Wesemael B. (2019). Soil Organic Carbon Mapping Using LUCAS Topsoil Database and Sentinel-2 Data: An Approach to Reduce Soil Moisture and Crop Residue Effects. *Remote Sensing* 11, 2121. <https://doi.org/10.3390/rs11182121>
- CEE (2006). Proposition de DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE. COM(2006). Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 31 p. Version française consultée le 05/06/2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006PC0232&from=it>.
- Commission européenne. (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, The European Council, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, vol. 2019. The European Green Deal. COM, 640 final. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52_019DC0640.
- Dharumarajan S., Hedge R., Janania S., Singh S.K. (2019). The need for digital soil mapping in India. *Geoderma Regional*, 16, e00204.
- Eglin T., Cousin I., Walter C. (2021). Contribution aux réflexions sur les concepts de fonctions des sols et de services écosystémiques, et leur évaluation. *Étude et Gestion des Sols* 28, 143-146.
- Ellili Bargaoui Y., Walter C., Michot, D., Saby N.P.A., Vincent S., Lemerrier B. (2019). Validation of digital maps derived from spatial disaggregation of legacy soil maps. *Geoderma*, 356, 113907.
- Fossey M., Angers D., Bustany C., Cudennec C., Durand P., Gascuel-Odoux C., Jaffrezic A., Pérès G., Besse C., Walter C. (2020). Framework to Consider Soil Ecosystem Services in Territorial Planning. *Environ. Sci.*, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00028>
- Froger C., Saby N.P.A., Claudy C., Boulonne L., Caria G., Freulon X., Fouquet C., Roussel H., Marot F., Bispo A. (2021). Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. *SOIL*, 7, 161–178. <https://doi.org/10.5194/soil-7-161-2021>
- Gomez C., Lagacherie P., Coulouma G. (2012). Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral Vis–NIR data. *Geoderma* 189–190, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.023>
- Gomez C., Vaudour E., Féret J.B., De Boissieu F., Dharumarajan S. (2022). Topsoil clay content mapping from Sentinel-2 data in croplands: influence of atmospheric correction methods across a season time series. *Geoderma*, accepté pour publication.
- Hu B., Bourennane H., Arrouays D., Denoroy P., Lemerrier B., Saby N.P.A. (2021). Developing global pedotransfer functions to harmonize extractable soil phosphorus measured with different methods: A case study across the mainland of France. *Geoderma*, 381, 114645.
- Humboldt-Dachroeden S., Rubin, O., Sylvester Frid-Nielsen S. (2020). The state of One Health research across disciplines and sectors – a bibliometric analysis. *One health*, 10, 100146.
- Keesstra S.D., Bouma J., Wallinga J., Tittonell P., Smith P., Cerdà A., Montanarella L., Quinton J.N., Pachepsky Y., van der Putten W.H., Bardgett R.D. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2(2), 111–128.
- Kidd D., Searle R., Grundy M., McBratney A.B., Robinson N., O'Brien L., Zund D., Arrouays D., Thomas M., Padarian J., Jones E., McLean Bennett J., Minasny B., Holmes K., Malone B., Liddicoat C., Meier E.A., Stockmann U., Wilson P., Wilford J., Payne J., Ringrose-Voase A., Slater B., Odgers N., Gray J., Van Gool D., Andrews K., Harms B., Stower L., Triantafyllis J. (2020). Operationalising Digital Soil Mapping - Lessons from Australia. *Geoderma Regional*, 23, e00335. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00335>.
- 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.

- Lacoste M., Minasny B., McBratney A.B., Michot D., Viaud V., Walter C. (2014). High resolution 3D mapping of soil organic carbon in a heterogeneous agricultural landscape. *Geoderma*, 213, 296-311.
- Le Bas C., Antoni V., Bispo A., Brunet J.F.N., Bougon N., Joassard I., Laville P., Renault P., Sauter J. (2022). 20 ans du GIS Sol. Enquête utilisateur sur les besoins de données sur les sols. *Restitution des résultats. GIS Sol*, 45p.
- Loiseau T., Richer-de-Forges A.C., Martelet G., Bialkowski A., Nehlig P., Arrouays D. (2020). Could airborne gamma spectrometric data replace lithological maps as co-variables for digital soil mapping of topsoil particle-size distribution? A case study in Western France. *Geoderma Regional*, 22, e00295.
- Loiseau T., Arrouays D., Richer-de-Forges A.C., Lagacherie P., Ducommun C., Minasny B. (2021). Density of soil observations in digital soil mapping: A study in the Mayenne region, France. *Geoderma Regional*, 24, e00358.
- McBratney A.B., Field D.J., Koch A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213.
- Messant A., Lehmann S., Moulin J., Lagacherie P., Jalabert S., Noraz A., Lemerrier B., Chafchafi A., Mure J.-P., Laroche B., Sauter J. (2021). Diffusion des Référentiels Régionaux Pédologiques sous la forme d'une carte des sols dominants (France métropolitaine hors-Corse) accessible sur le Géoportail. *Etude et Gestion des Sols*, 28 (1), 57-70.
- Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N.J., Badraoui M., Chude V., Baptista I., Mamo T., Yemefack M., Singh Aulakh M., Yagi K., Young Hong S., Vijarnsorn P., Zhang G.-L., Arrouays D., Black H., Krasilnikov P., Sobocká J., Alegre J., Henriquez C.R., Mendonça-Santos MdL., Taboada M., Espinosa-Victoria D., AlShankiti A., AlaviPanah S.K., Elsheikh Z.A.E., Hempel L., Camps Arbestain M., Nachtergaele F., Vargas R. (2016). World's soils are under threat. *SOIL*, 2, 79-82.
- Montanarella L., Vargas R. (2012). Global governance of soil resources as a necessary condition for sustainable development. *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 559-564.
- Ortiz García S., Saynes Santillan V., Bunge-Vivier V., Marisol Anglés-Hernández M., Eduardo Pérez M., Prado B. (2022). Soil governance and sustainable agriculture in Mexico. *Soil Security*, 7, 100059.
- Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. (2012). European Soil Data Centre: response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29, 329–338.
- Panagos P., Montanarella L., Barbero M., Aguglia L., Jones A. (2022). Soil priorities in the European Union. *Geoderma Regional*, 29, e00510.
- Raia P.S., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, 125, 365-385.
- Ranjard L., Sauter J., Auclerc A., Chauvin C., Cluzeau D., Mereau D., Philippe Loiseau-Dubosc P., Lemerrier B., d'Oiron E., Raous S., Roturier C., Rovillé M., Serin L., Gascuel-Odoux C. (2022). Sciences et recherches participatives sur les sols en France : bilan et perspectives. *Étude et Gestion des Sols*, 29, 381-393.
- Richer-de-Forges A.C., Arrouays D. (2010). Analysis of requests for information and data from a national soil data centre in France. *Soil Use and Management*, 26: 374-378.
- Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Bardy M., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier 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/su1102940.
- Rossiter D., Liu J., Calisle S., Zhu A.-X. (2015). Can citizen science assist digital soil mapping? *Geoderma*, 259-260, 71-80.
- Styc Q., Gontard F., Lagacherie P. (2021). Harvesting spatially dense legacy soil datasets for digital soil mapping of available water capacity in Southern France. *Geoderma Regional*, 24, e00353.
- Thompson J.A., Kienast-Brown. S., D'Avello T., Philippe J., ColbyBrungard C. (2020). Soils2026 and digital soil mapping – A foundation for the future of soils information in the United States. *Geoderma Regional*, 22, e00294.
- Urbina-Salazar D., Vaudour E., Baghdadi N., Ceschia E., Richer-de-Forges A.C., Lehmann S., Arrouays D. (2021). Using Sentinel-2 Images for Soil Organic Carbon Content Mapping in Croplands of Southwestern France. The Usefulness of Sentinel-1/2 Derived Moisture Maps and Mismatches between Sentinel Images and Sampling Dates. *Remote Sensing* 13, 5115. <https://doi.org/10.3390/rs13245115>
- Vaudour E., Girard M.C. (2010). Pédologie. Chap. 23. In : Girard MC & Girard CM, *Traitement des données de télédétection*, Dunod, Paris.
- Vaudour E., Gomez V., Fouad Y., Lagacherie P. (2019a). Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperate and Mediterranean agroecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 223, 21-33.
- Vaudour E., Gomez C., Loiseau T., Baghdadi N., Loubet B., Arrouays D., Ali L., Lagacherie P. (2019b). Impact of acquisition date on the prediction performance of topsoil organic carbon content from Sentinel-2 for cropland agroecosystems. *Remote Sensing*, 11(18), 2143. <https://doi.org/10.3390/rs11182143>.
- Vaudour E., Gholizadeh A., Castaldi F., Saberioon M., Borůvka L., Urbina-Salazar D., Fouad Y., Arrouays D., Richer-de-Forges A.C., Biney J., Wetterlind J., Van Wesemael B. (2022). Satellite imagery to map topsoil organic carbon content over cultivated areas: an overview. *Remote Sensing*, 14, 2917. <https://doi.org/10.3390/rs14122917>.
- Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B., Richer-de-Forges A.C., Sauter J., Schnebelen N. (2020). Possible futures of soil mapping in France. *Geoderma Regional*, 23, e00334.

Sommaire

Préface

Présidents du Gis Sol

Editorial « La connaissance et la surveillance des sols de France : genèse, programmes, évolutions et perspectives du GIS Sol »
Bispo A., Gascuel-Odoux C., Laroche B.

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

Arrouays D., Stengel P., Feix I., Lesaffre B., Morard V., Bardy M., Bispo A., Laroche B., Caquet T., Juille F., Rabut M., Soussana J.-F., Voltz M., Gascuel-Odoux C.

Les programmes du GIS Sol : 20 ans d'ajustement en réponse aux enjeux

Bispo A., Laroche B., Saby N.P.A., Jolivet C., Ratié C., Le Bas C., Richer-de-Forges A.C., Brunet J.-F., Eymard A., Commagnac L., Gascuel-Odoux C., Arrouays D.

Les données du GIS Sol pour appuyer les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique : barrières et stratégies de valorisation

Martin M. P., Duparque A., Bispo A., Saby N.P.A., Guenet B.

L'offre du GIS Sol en appui aux questions de santé : les données disponibles et leur utilisation pour les politiques publiques et la recherche

Froger C., Pelfrène A., Volatier J.-L., Roussel H., Marot F., Brunet J.-F., Saby N.P.A., Bispo A.

Vers une stratégie du GIS Sol pour la connaissance et la protection de la biodiversité des sols

Imbert C., Valé M., Lévêque A., Jolivet C., Bispo A.

L'offre du GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain

Brunet J.-F., Branchu P., Eyche C., Belbèze S., Guyonnet D.

Le GIS Sol dans les départements et régions d'Outre-mer français

Brossard M., Fujisaki K., Jolivet C., Dupuits-Bonnin E., Jameux M., Jalabert S., Toulemonde Le Ny E., Becquer T., Blavet D., Beaudou A., Boulonne L., Desjardins T., Le Martret H., Ratié C.

Le système d'information sur les sols de France : capitaliser, analyser, diffuser, aller vers l'open data

Le Bas C., Brossard M., Brunet J.-F., Commagnac L., Beaudou A., Belbèze S., Bellifa M., Boukir H., Dalmaso M., Derrière N., Lattelais C., Le Martret H., Lehmann S., Pickel A., Richer-de-Forges A.C., Saby N., Schellenberger A., Taffoureau E., Toutain B., Wurpillot S., Yahiaoui R.

Prendre en compte le statut juridique des données dans les programmes du GIS Sol

Rennes S., Le Bas C., Le Bideau S., Hissel F.

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

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.

Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société

Renault P., Cousin I., Gascuel-Odoux C., Antoni V., Bispo A., Bougon N., Desrousseaux M., Feix I., Joassard I., Laville P., Pierart A., Caquet T.

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 ?

Gascuel-Odoux C., Renault P., Antoni V., Arrouays D., Bougon N., Denys S., Fiquet J., François Y., Ille A., Joassard I., Kaszynski M., Laville P., Le Bas C., Vaudour E., Bispo A.

EGS / AFES

2163, avenue de la Pomme de Pin, CS 40001, Ardon, 45075 Orléans Cedex 2 France

tél : (0) 02 38 41 48 02 - Fax : (0) 02 38 41 78 69

<http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/egs-instructions-aux-auteurs/>

Numéros : ISSN 1252-6851 - CPPAP : 0612 G82389