

FOCUS

Conserver les sols : pourquoi et comment ?

Nicolas SOLER-DOMINGUEZ¹

Céline RATIÉ²

Céline FAIVRE-PRIMOT³

Samuel MONDY⁴

CORRESPONDANCE

nicolas.soler-dominguez@inrae.fr

celine.ratie@inrae.fr

celine.favre-primot@inrae.fr

samuel.mondy@inrae.fr

Pour comprendre le fonctionnement et les cycles du sol, il faut pouvoir l'étudier, donc le conserver. Plusieurs Infrastructures participent à une meilleure connaissance et gestion des sols, grâce à une approche pluridisciplinaire : les Observatoires de Recherche de l'Environnement (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02330284>), les zones Ateliers (<https://www.za-inee.org/>), les Infrastructures de Recherche comme AnaEE ou RARe, les plateformes d'expérimentation en milieux contrôlés ou *In Natura*, ou encore les groupements scientifiques.

En particulier à INRAE, deux structures ont été montées avec comme activité principale la conservation de sols : le Conservatoire Européen des Échantillons de Sols (<https://doi.org/10.15454/VCZ6BS> Orléans, Centre Val de Loire) et le Centre de Ressource Génétique de la plateforme GenoSol (<https://doi.org/10.15454/L7QN45> Dijon, Centre Bourgogne - Franche-Comté). Ces deux outils sont complémentaires et permettent de répondre aux enjeux pluridisciplinaires de l'institut et à ses objectifs, en particulier sur la composante sol, que ce soit dans le cadre de l'objectif 4pour1000 (<https://www.4p1000.org/fr>) ou dans la réponse des sols au dérèglement climatique. Focus sur ces deux Infrastructures Scientifiques Collectives d'INRAE (labellisées ISC).

1 Unité InfoSol US 1106 - Responsable technique du Conservatoire Européen des Échantillons de Sols.

2 Unité InfoSol US 1106 - Responsable de la plateforme CEES.

3 UMR Agroécologie 1347 - Responsable CRG de la plateforme GenoSol.

4 UMR Agroécologie 1347 - Responsable de la plateforme GenoSol.

Le sol, une interface vitale et complexe

Le sol est une couche meuble qui résulte de l'interaction entre la lithosphère (dégradation de la roche-mère), l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Non renouvelable à l'échelle d'une génération humaine, il se définit habituellement par sa composition et ses propriétés.

C'est un véritable capital naturel, caractérisé par le stockage de matière minérale et organique, par la biodiversité qu'il héberge, mais aussi par les flux qu'il génère et qui permettent de fournir nombre de services répondant à des besoins humains. Ces services que l'on qualifie de services écosystémiques (Figure 1) sont regroupés en quatre grandes catégories i) services de support ii) services d'approvisionnement iii) services de régulation iv) et services culturels. Ils permettent de remplir de nombreux besoins : physiologique, santé, sécurité, nourriture et habitat.

Pour comprendre le fonctionnement et les cycles du sol, il faut pouvoir l'étudier ; et ce, à de multiples échelles, tant d'un point de vue spatial, en intégrant la composante en trois dimensions du sol, que temporel, en regardant l'évolution du sol en fonction des saisons et de l'hygrométrie, en particulier dans un contexte de dérèglement climatique. La conservation du sol provenant de dispositifs naturels ou d'expérimentation devient un challenge important pour i) La valorisation de dispositifs expérimentaux de long terme et ii) la mise en conservation d'échantillonnage de grande ampleur, tel le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Cette conservation a pour but la mise en mémoire

des sols et contribue à une meilleure compréhension de ses mécanismes. Il est important de noter que les conditions de stockage de ces échantillons sont dépendantes des questions scientifiques : les solutions techniques et de gestion des aliquots seront différentes et adaptées en fonction des questions.

Les enjeux de la conservation des sols

Les changements actuels liés au dérèglement climatique, l'anthropisation croissante des écosystèmes et la volonté d'engager la transition agroécologique nécessitent d'avoir à disposition du monde scientifique des témoins et des standards d'échantillons de sols qui pourront être comparés aux échantillons qui seront prélevés dans le futur. De plus, les importants investissements financiers et humains, dans le cas de dispositifs expérimentaux ou de suivi à long terme, exigent de pouvoir valoriser le travail accompli. Il est ainsi primordial de pouvoir conserver des quantités suffisantes d'échantillons de sols, mais aussi de garantir la stabilité de leurs caractéristiques et propriétés, sur le long terme, pour pouvoir les **remobiliser** ; en effet, les avancées technologiques font qu'il sera possible d'analyser ultérieurement ces échantillons avec des méthodes de rupture. Ce principe de prévoir la réalisation des analyses a posteriori avec des techniques non disponibles au moment du prélèvement est un point crucial de la conservation. En effet, il permettra, en fonction des évolutions observées d'indicateurs, de vérifier le niveau en amont et d'appréhender les dynamiques

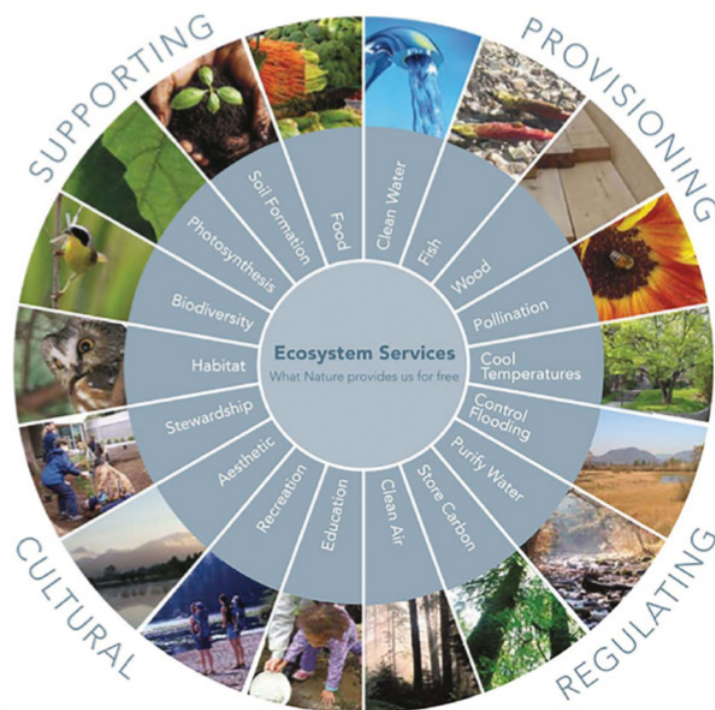


Figure 1. Les services écosystémiques selon le Millenium Ecosystem Assessment (source Metro Vancouver)

spatiales et temporelles sous-jacentes. Ces analyses a posteriori pourraient répondre à des **problématiques émergentes** ou à de nouvelles questions non présentes au moment de l'échantillonnage.

Les techniques d'analyses, les seuils de détection de différents éléments s'affinent au fur et à mesure des années, la remobilisation d'échantillons conservés permet la mise en évidence de **nouvelles informations** non accessibles avant. De plus, des conditions stables de conservation, associées à un suivi métrologique, doivent permettre de vérifier la stabilité ou non des échantillons conservés, en particulier **l'évaluation d'éventuelles dérives analytiques** dans le temps. L'utilisation d'échantillons standards doit permettre de distinguer ce qui ressort des facteurs de forçage plus que d'évolutions des caractéristiques des sols au cours du stockage. Par exemple, la quantité de Carbone organique en fonction des conditions de stockage (lyophilisation ou

non, conservation à température ambiante ou congélation) peut varier au cours du stockage. Il est impératif de pouvoir évaluer ces évolutions. Enfin, la conservation des échantillons permet de découpler prélèvement et analyses, ce qui permet de rendre possible des analyses pour lesquelles aucun budget n'était disponible au moment du prélèvement.

Les mesures et analyses des caractéristiques du sol peuvent être de plusieurs natures (Figure 2). Ainsi, le CEES (Conservatoire Européen des Échantillons de Sols) et le CRB (Centre de Ressources Biologiques) de la plateforme GenoSol, bien que travaillant sur la même matrice environnementale, le sol, ne mesurent pas les mêmes choses. Le CEES vise plus à permettre la caractérisation physico-chimique et donc une conservation permettant ce type d'analyse, tandis que la plateforme GenoSol s'intéresse aux mesures de l'activité biologique, en particulier de la diversité des micro-organismes (bactéries, archées et champignons).

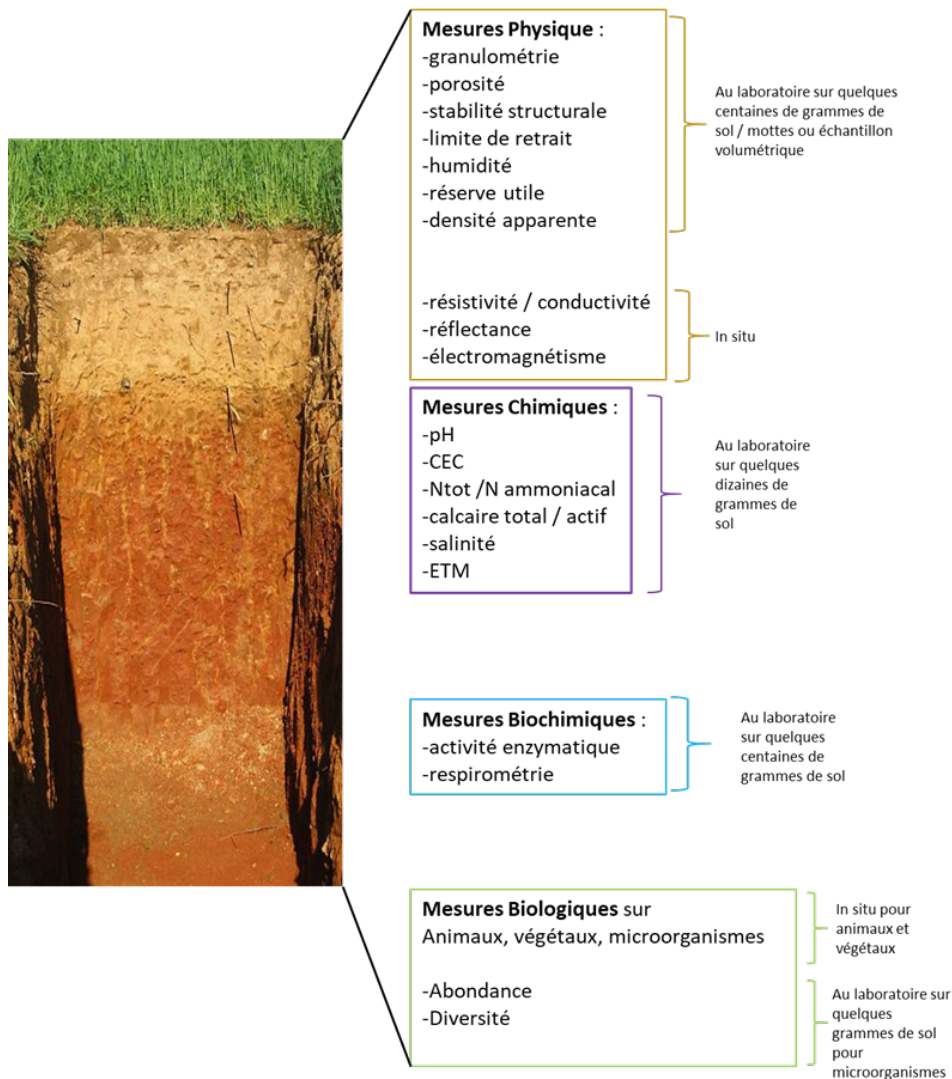


Figure 2. Diversité des paramètres mesurables pour un échantillon de sol. Les mesures peuvent être physiques, chimiques, biologiques ou biochimiques.

Les différentes analyses nécessitent des masses différentes et des modes de préparation différents, qui ont un impact sur les processus de préparation des échantillons (Tableau 1). Le dimensionnement des structures de conservation et les flux analytiques sont donc variés, et dépendent du type d'analyses ainsi que des questionnements scientifiques ou sociétaux auxquels ces analyses doivent répondre.

Tableau 1: Relation entre analyses, prise d'essai et mode de préparation, et horizons étudiés

Analyses	Prise essai	Préparation échantillon	Commentaire
Activité enzymatiques	Quelques dizaines de grammes	Frais Tamisé 5mm	Sur horizon de surface
Microbiologie : approche cultivable	Quelques grammes	Sec ou frais tamisé	Sur horizon de surface
Microbiologie : approche moléculaire	1g	Lyophilisé et tamisé 4mm	Sur horizon de surface
Physico-chimie	De 1 à quelques centaines de grammes	Brut, broyé à 2mm, broyé<250µm	Sur différents horizons
Mésofaune	Cylindre 5cm diamètre	Sol brut	Sur horizon de surface (Profondeur 4cm)
Lombric	In situ sur 3*1m ²	Extraction formol/moutarde ou test bêche	
Macrofaune totale	Bloc sol 25*25*15 cm	Sol brut	Sur différents horizons
Stock semencier	300g	Sol brut non remanié	Sur horizon de surface

Le Conservatoire Européen des Échantillons de Sols (CEES) : un bâtiment en terre pour stocker des échantillons de sols...

Le Conservatoire des Sols est géré par l'unité InfoSol d'INRAE. Géographiquement implanté sur le Centre d'Orléans (<https://www.gissol.fr/le-gis/conservatoire-des-sols-992>), il est rattaché au Département AgroEcoSystem. L'unité InfoSol dépend directement du Groupement d'Intérêt Scientifique «Sol» Gis Sol (<https://www.gissol.fr/>). Ce GIS a été créé, en 2001, à l'initiative de plusieurs partenaires (le ministère de la transition écologique, le ministère de l'agriculture et de l'alimentation, l'ADEME, l'IGN, l'IRD, l'OFB, le BRGM et INRAE) ; il a pour but de constituer et de gérer le système d'information sur les sols de France, en vue de répondre aux demandes des pouvoirs publics et de la société, aux niveaux local et national.

Le Gis Sol conçoit, oriente et coordonne l'inventaire géographique des sols, le suivi de leurs propriétés et l'évolution



de leur qualité, en même temps qu'il gère le système d'information sur les sols (Donesol). Il assure également la valorisation des données sur les sols de France, en cohérence avec les programmes européens.

Le CEES constitue un outil collectif d'INRAE dont l'objectif principal est **la conservation à long terme d'échantillons de sols**. Il a été mis en place, en 2003, pour les échantillons de sols prélevés dans le cadre du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Ses activités se sont par la suite étendues, d'une part, aux échantillons issus des programmes nationaux d'inventaires de sols et, d'autre part, à des échantillons issus de programmes scientifiques de surveillance des sols, comme le projet européen Integrated Carbon Observation System (ICOS).

L'équipe du Conservatoire est composée de cinq personnes. Le CEES est un local de stockage d'environ 370 m² qui contient environ 70 000 échantillons, soit 98 tonnes, conservés en conditions contrôlées, adossé à un laboratoire comprenant une salle de réception/préparation des échantillons, salle de séchage, salle des étuves et une salle de lavage. Il utilise la base de données de l'Unité, Donesol, pour l'enregistrement des échantillons et toute la traçabilité de leur traitement, depuis leur arrivée au Conservatoire jusqu'à leurs divisions successives par création d'aliquotes pour envoi aux laboratoires partenaires ou pour des mises à dispositions ultérieures (Figure 3).

Donesol permet d'enregistrer la description du profil faite sur le terrain, d'où sont prélevés les échantillons. Ces derniers, après vérification de leur validité par rapport au cahier des charges, sont rattachés aux horizons décrits ; l'historique de leurs actions est enregistré jusqu'à leur stockage définitif. En fin de chaîne, la BdD permet d'associer à ces données pédologiques les résultats des analyses faites dans différents laboratoires INRAE ou non-INRAE, en fonction des projets associés.

Le Conservatoire a pour vocation de garder le plus longtemps possible les échantillons à disposition pour des projets scientifiques, de nouvelles analyses ou encore des ré-analyses en fonction de problématiques. Dans ce cadre,

les objectifs de la conservation sont :

- Construire la mémoire de nos sols pour pouvoir remonter le temps.
- Prévoir les évolutions en termes d'analyses : fournir un même échantillon quelques années plus tard pour refaire des analyses dont le seuil de détection a été amélioré ou encore faire une analyse qui n'était pas possible ou trop coûteuse quelques années plus tôt.
- Mettre à disposition une banque d'échantillons et les métadonnées associées.



Figure. 3. Process de mise en conservation : de la réception à la conservation des sols

Le CEES étant une plateforme INRAE, on pourrait considérer qu'il a vocation à recevoir tous les échantillons de sols provenant de dispositifs expérimentaux ou d'observatoires environnementaux patrimoniaux. Or, de par la capacité de stockage limitée du conservatoire et la nature du processus de mise en conservation, l'intégration des échantillons est soumise à conditions :

- Le lot d'échantillons doit correspondre à une étude pédologique déjà présente (ou saisie à l'occasion) dans la Base de Données nationale Donesol.
- Le lieu de prélèvement de l'échantillon est repéré par des coordonnées géographiques (en BdD).
- L'échantillon doit être intègre (ne pas avoir subi de modification physique, séchage à température élevée, etc.)

- L'échantillon doit être en quantité suffisante entre 500 g et 1 kg en moyenne.

Les demandes de stockage comme les demandes de mise à disposition d'échantillons sont arbitrées par le Gis Sol qui gouverne l'Unité InfoSol et le CEES.

Le Centre de Ressources Génétiques de la plateforme GenoSol



La deuxième structure INRAE dont le cœur de métier est la conservation à long terme de matrices environnementales se situe dans l'UMR Agroécologie de Dijon ; elle a pour objectif le stockage et la caractérisation moléculaire d'échantillons de sols par des approches de communautés microbiennes.

La plateforme GenoSol a été créée, en 2008, au sein de l'UMR Agroécologie INRAE, centre Bourgogne-Franche-Comté de Dijon (https://www2.dijon.INRAE.fr/plateforme_genosol/). Cette plateforme offre une infrastructure unique en Europe, dont l'objectif est de fournir une structure logistique et technique assurant l'acquisition, la conservation, la caractérisation et la mise à disposition des ressources génétiques (ADN) des sols issus d'échantillonnages de grande envergure. Elle s'articule autour de trois structures principales :

- Un **Centre de Ressources Génétiques (CRG)** qui a pour but de stocker et de conserver les ressources génétiques (sols et ADN) et de les mettre à disposition de la communauté scientifique.
- Un Laboratoire d'Analyses et de Développement Moléculaires. Cette **plateforme technique** a pour but de développer la veille technologique sur les méthodes d'extraction des acides nucléiques des sols et les outils de caractérisation des ressources génétiques microbiennes. La plateforme a, dans un premier temps, travaillé sur des approches de type métabarcoding (amplification de gènes marqueurs). Elle évolue en ajoutant à son offre de services des extractions permettant des approches métagénomiques et métatranscriptomiques.

- Un **Système d'Information Environnementale** (SIE) centré sur le développement de la base de données MicroSol-database (<http://prodinra.inra.fr/record/20022>) qui permet, d'une part, de gérer le conservatoire, les métadonnées associées aux sols et la traçabilité de ses échantillons (lieu de stockage, suivi des opérations sur les sols) et, d'autre part, de stocker les données issues des analyses du LADM.

La plateforme GenoSol, pour ses activités de conservatoire et de SIE, est articulée avec le CEES d'INRAE Orléans qui, via la base de données Donesol, stocke les résultats des analyses physico-chimiques des sols (Carbone, azote, pH, polluants...). Sur les 21 000 sols stockés au sein du CRG de la plateforme GenoSol, environ 4 000 sols sont communs avec ceux d'InfoSol. Ces deux conservatoires sont destinés à des communautés scientifiques et professionnelles différentes (science du sol, pour InfoSol, et biologie/écologie pour GenoSol). La plateforme s'est engagée dans une démarche d'amélioration continue, dès sa création, qui a été couronnée par une certification ISO9001, en 2015, pour le CRG, puis pour la totalité du périmètre de la plateforme en 2018.

proposée, lors des périodes habituelles d'échantillonnage (février à mai), et sur les dispositifs en démarrage, pour assurer la formation des personnels des sites au prélèvement et à la préparation. Les échantillons de sols conservés proviennent en majorité de réseaux de surveillance et d'observation des sols (nationaux et européens), de sites expérimentaux pérennes (INRAE, CNRS, IRD, Institut technique agricole...) et de réseaux d'exploitations agricoles. Tous ces sites sont impliqués dans des questionnements en lien avec l'évaluation environnementale des modes d'usages des sols, et trouvent dans la plateforme GenoSol une aide logistique pour renforcer les systèmes d'observation de la biodiversité tellurique. À ce jour, plus de 21 000 sols sont stockés dans le CRG, et 600 à 1 000 nouveaux sols arrivent annuellement. Les locaux de 150 m² abritent 20 congélateurs -40 °C d'une capacité de 1 440 échantillons chacun. Deux congélateurs de secours sont prévus pour permettre la mise en sécurité des échantillons en cas de pannes.

Après avoir échantillonné le dispositif, les sols sont homogénéisés puis tamisés à 4 ou 5 mm pour obtenir un échantillon de sol représentatif, dépourvu de la majorité

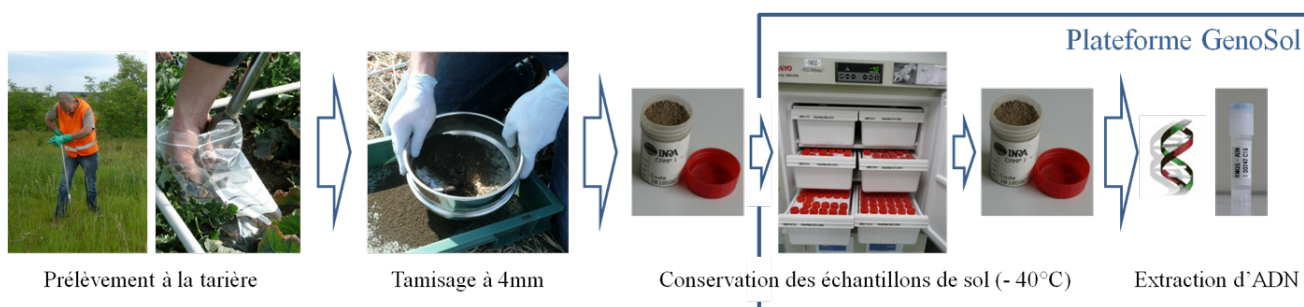


Figure 4. Process de mise en conservation des échantillons des sols au sein de la plateforme GenoSol

Le Centre de ressources génétiques de la plateforme GenoSol a pris le parti de conserver les informations génétiques des microorganismes (ADN) dans sa matrice originelle. Ainsi, le mode de conservation est axé sur la conservation du sol. L'ADN nécessaire à l'alimentation des outils moléculaires est extrait à partir d'une fraction de ce sol conservé (1 g). La conservation mise en place vise à garantir l'absence de modification biologique à l'intérieur de l'échantillon.

Le CRG se compose actuellement d'une Technicienne de Recherche à temps plein. Son activité principale est la gestion de la collection avec la réception et le tamisage des échantillons, leur mise en conservation, le suivi des installations et la fourniture des échantillons pour le laboratoire d'analyses moléculaires. Une activité de conseil sur la stratégie d'échantillonnage et l'aide au prélèvement est aussi

des éléments non concernés par les analyses ultérieures (cailloux, débris végétaux, restes animaux...). Ils sont ensuite réceptionnés au CRG et congelés à -30 °C. Cette étape de congélation permet de stopper la vie biologique de l'échantillon et prépare le sol à la lyophilisation (Figure 4). Les acides nucléiques dans les sols sont dégradés par des enzymes nucléiques microbiennes. Le retrait de l'eau par lyophilisation empêche le fonctionnement de ces enzymes. La lyophilisation est un processus où l'eau est retirée par sublimation à partir d'un échantillon congelé sous une contrainte de vide. Pendant une cinquantaine d'heures, le sol est soumis à des températures négatives (-80 °C) et en contrainte de vide poussé (0.01 mBar). L'échantillon ainsi dépourvu de son eau acquiert une stabilité dans les conditions de stockage choisies par le CRG. En effet, même après lyophilisation, le stockage à long terme en température négative permet de conserver l'information liée à l'ADN

et à l'ARN. La lyophilisation présente un double avantage : elle permet à la fois de stabiliser l'échantillon et de pouvoir travailler sur un échantillon pour lequel la prise d'essai se fait sur la masse sèche. Cela permet de faire voyager des échantillons d'un pays à l'autre dans un délai raisonnable tout en assurant une bonne conservation de l'information génétique.

Le CEES et GenoSol, des infrastructures en relation étroite

Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34>) est un outil de surveillance des sols à long terme. Les sols évoluent constamment sous l'effet de grands facteurs naturels et sous l'effet des activités humaines (usages, aménagements fonciers, pratiques agricoles, épandages de boues, retombées atmosphériques, pollutions accidentelles...). Ces évolutions d'origine anthropique sont, la plupart du temps, préjudiciables au maintien de la qualité des sols. Elles sont le résultat de processus longs et cumulatifs, difficilement détectables et dont certains sont parfois irréversibles à l'échelle de temps humaine. Le maintien de la qualité des sols rend indispensable de détecter, de façon précoce, l'apparition et les tendances de ces évolutions, à l'aide de programmes d'observation et de suivi de la qualité

des sols. Depuis l'an 2000, le RMQS répond à ces objectifs d'évaluation et de suivi à long terme de la qualité des sols de France (Figure 6). Le RMQS repose sur le suivi de 2 240 sites répartis uniformément sur le territoire français (métropole et outre-mer), selon une maille carrée de 16 km de côté. Des prélèvements d'échantillons de sols, des mesures et des observations sont effectués, en moyenne, tous les quinze ans au centre de chaque maille. La première campagne de prélèvement en métropole (RMQS1) s'est déroulée de 2000 à 2009 et a permis la mise en place de 2 170 sites. La deuxième campagne métropolitaine (RMQS2) a débuté en 2016 et s'étend jusqu'en 2027. Le RMQS couvre également les départements d'Outre-mer, avec 70 sites répartis aux Antilles, à la Réunion, à Mayotte et en Guyane. L'évaluation et le suivi de la qualité des sols sont fondés sur l'analyse de propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, associées à la recherche des sources de contamination diffuse et à la connaissance de l'historique de l'occupation et des pratiques de gestion de chaque site. De nouveaux paramètres ont été ajoutés, afin de mieux évaluer la sensibilité des sols en contexte de changement climatique (réserve utile, matières organiques particulières, stocks de carbone profond). Des perspectives d'adosser au RMQS un programme de phytopharmacovigilance dans les sols et un réseau de surveillance de la biodiversité du sol (faune, flore, microorganismes bactériens et fongiques) sont à l'étude. Au total, ce sont 5 à 20 kg de terre par échan-

Exemple de complémentarité des laboratoires autour d'un même programme et d'un même échantillon composite de sol: le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS)

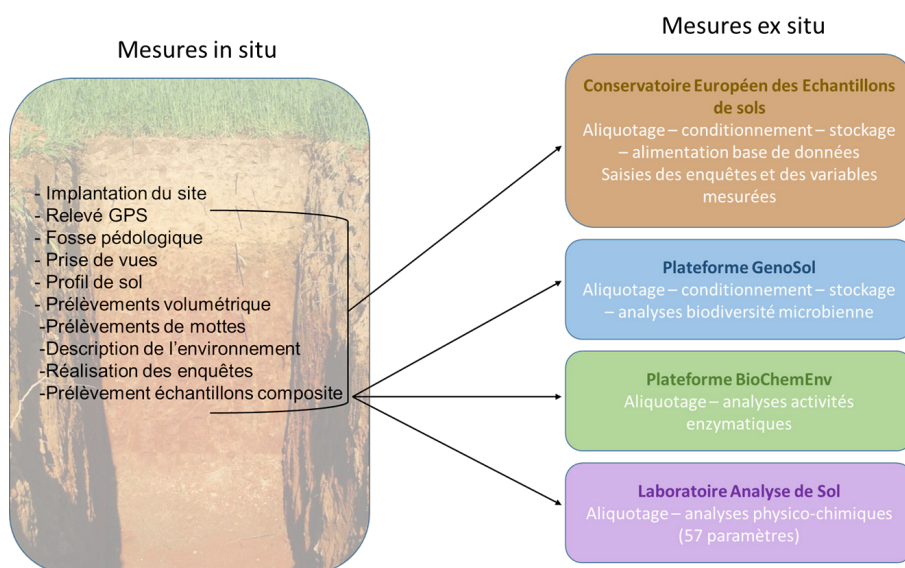


Figure 6. Ensemble de l'offre de service des plateformes « sol » d'INRAE

tillon qui sont envoyés et stockés au CEES, et 500 g à GenoSol. Ce type de programme de grande envergure intéresse nombre de champs thématiques et voit son aire d'influence augmenter au gré des appels d'offres. Pourtant, l'équipe de base reste la même.

La banque d'échantillons ainsi constituée permet d'accéder à un ensemble d'échantillons géoréférencés et représentatifs de la variété des sols français et de leurs occupations, lui conférant un caractère hautement patrimonial.

Perspectives des infrastructures

Au niveau du CEES, la quantité de matériel géré a mis en évidence des besoins d'évolution dans l'archivage des échantillons. Une réflexion est en cours pour essayer d'automatiser la sortie des échantillons et éviter ainsi des manipulations humaines, notamment le port de lourdes charges. Cette innovation permettrait d'optimiser la place et le contrôle des conditions de stockage. Un projet d'agrandissement avec un bâtiment enterré moins énergivore, associant stockage souterrain et bureaux à la surface, est en cours de réflexion.

Si l'ambition actuelle des deux structures CEES et CRG GenoSol est orientée vers la conservation à long terme des échantillons environnementaux, il leur tient à cœur de pouvoir mesurer l'impact de la conservation sur les informations contenues dans ces sols. Pour ce faire, chaque structure analyse un même échantillon, pour comparer ses caractéristiques et/ou sa structure, à des temps de conservation différents. Ces processus de vérification sont cependant coûteux en temps et en ressources et nécessiteraient donc d'être soutenus par les tutelles.

Le CRG GenoSol est en cours de déploiement d'une solution de traçabilité qui remplacerait le système d'informations actuel. Ce LIMS (Laboratory Information Management System) est commun aux laboratoires avec lesquels Geno-

Sol travaille régulièrement (BioChemEnv et le LAS d'Arras) et permettrait, avec un même outil, de centraliser dans une même base de données tous les paramètres mesurés sur un même échantillon.

Quant au CEES, il étudie la faisabilité d'utiliser ce LIMS en partie à la place de la base de données actuelle ou en complément de celle-ci. L'idée étant, pour le département AgroEcoSystem, de faciliter la communication entre ses différents laboratoires et plateformes ainsi que les envois d'échantillons ou les mises en communs de résultats d'analyses. L'unité InfoSol ayant une BdD déjà bien éprouvée et qui contient toutes les données pédologiques correspondantes aux échantillons, nous devons nous assurer qu'il n'y aura pas de doublonnage.

Enfin, la plateforme GenoSol, dans le cadre du Contrat Plan État Région sur la période 2021-2027, va lancer le projet Culturomics (CPER 2021-2027). Le développement de cette activité se fera en étroite collaboration avec les équipes de l'UMR Agroécologie. Elle vise à développer une nouvelle activité, au sein de la plateforme GenoSol, qui reposera sur des approches «single cell» et de «culturomics». L'objectif est de développer un pipeline analytique à même de proposer une offre novatrice visant à : (i) isoler des consortia et isolats microbiens des sols, (ii) caractériser fonctionnellement les consortia et isolats microbiens par des approches métagénomiques (séquençage shotgun), métatranscriptomiques et métabolomiques et (iii) les stocker dans la collection de microorganismes d'intérêt agro-environnemental de l'UMR Agroécologie (Centre de Ressource Biologique). Le développement de cette activité permettra d'exploiter la diversité microbienne des sols dans des approches d'ingénierie écologique, indispensables à la transition écologique de l'agriculture, et d'alimenter le CIRM ou tout autre CRB en espèces microbiologiques candidates pour des approches de détoxification, de biocontrôle ou d'ingénierie métabolique. ■



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-SA). <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « NOV'AE », la date de sa publication et son URL.