

Livres blancs



Les sols
2013-2015

LIVRE BLANC

Les sols

Rapport du Réseau Thématique Pluridisciplinaire « Sols » juillet 2013 - janvier 2015

Fabien Arnaud, Aline Dia, Denis Faure, Jérôme Gaillardet, Florian Mermillod-Blondin et Christian Valentin

Ces auteurs sont tous affectés à des unités mixtes à rattachement principal CNRS-INSU ou CNRS-InEE.

En rédigeant ce document, ils ont traduit les objectifs de la lettre de mission de Nicolas Arnaud (DAS CNRS-INSU) et Gudrun Bornette (DAS CNRS-INEE) (*cf.* Annexe 1) en termes de tâches dont la plupart ont pu être réalisées (*cf.* Annexe 2).

À partir de leur lettre de mission (Annexe 1), les six animateurs du Réseau Thématique Pluridisciplinaire « Sols » ont défini des tâches et des jalons qu'ils se sont répartis pour analyser, au cours du deuxième semestre 2013, la situation de la recherche et de l'enseignement supérieur en France et à l'étranger.

Ils se sont réunis le 5 décembre 2013 (journée internationale des sols) pour une première synthèse qui a donné lieu à des échanges de vue avec Nicolas Arnaud et Gudrun Bornette. Le premier semestre 2014 a été consacré à un approfondissement de cette analyse et à la préparation des journées des 7 et 8 octobre.

Ces journées avaient pour double objectif de compléter et valider cette analyse, et de fournir les principaux éléments de prospective. À cet effet, y on été invités à la fois de jeunes chercheurs représentatifs des thèmes en émergence et des seniors reconnus dans leurs domaines (Annexe 3).

La première partie de ce livre blanc constitue la synthèse de l'ensemble de la démarche. La seconde partie retranscrit l'essentiel des présentations et des échanges très stimulants de ces journées. La troisième partie présente les principales leçons qui peuvent en être tirées par et pour le CNRS.

Sommaire

Éditorial	p. 7
Principales recommandations	p. 9

Rapport

Contexte	p. 12
Priorités de recherche	p. 21
Instruments.....	p. 23
Enseignement et formation.....	p. 25

Journées du Réseau Thématique Pluridisciplinaire « Sols »

Contexte de la réflexion et objectifs des journées du RTP Sols – C. Valentin (IEES-PARIS)	p. 28
Les thèmes de recherche d'avenir : le point de vue des jeunes chercheurs	p. 29
Les thèmes de recherche d'avenir : le point de vue d'autres chercheurs.....	p. 34
Les domaines d'excellence actuels du CNRS : débat introduit et animé par F. Arnaud (EDYTEM) .	p. 39
Le partenariat à travers les UMR : débat introduit et animé par C. Valentin (IEES-PARIS).....	p. 40
Éléments de prospective : débat introduit et animé par C. Valentin (IEES-PARIS)	p. 41
Quelle formation pour les chercheurs? J. Poulenard (EDYTEM).....	p. 44
Les instruments.....	p. 45

Leçons à tirer des journées

Conclusions	p. 50
Des verrous à lever	p. 51
Vers une mobilisation accrue des ressources du CNRS	p. 53

Annexes

Annexe 1 - Lettre de mission	p. 60
Annexe 2 - Objectifs, tâches et jalons du RTP Sols	p. 62
Annexe 3 - Participants aux journées du RTP Sols	p. 63

Éditorial

Les sols sont une ressource non renouvelable, et comme l'eau, leur préservation est essentielle pour assurer notamment sécurité alimentaire et avenir durable à nos sociétés. Les sols sont aujourd'hui au cœur des défis sociétaux mis en exergue par la Stratégie Nationale de Recherche. Ils sont fondamentaux pour la végétation naturelle et cultivée, ou gérés pour produire aliments, matériaux, combustibles, produits médicinaux... Ils maintiennent la biodiversité et constituent un réservoir majeur du carbone continental : s'ils peuvent potentiellement contribuer à l'effet de serre, notamment dans les régions arctiques dont les pergélisols sont soumis au réchauffement global, ils offrent également un potentiel pour lutter contre le changement climatique et s'y adapter en stockant le carbone. Les sols jouent aussi un rôle clé dans le cycle de l'eau, améliorant la résilience aux inondations et aux sécheresses en retenant les eaux de pluie et de ruissellement. Ils constituent enfin l'interface avec la terre solide et ses couches profondes, avec un impact essentiel sur la morphologie de la surface et les grands cycles géochimiques et géodynamiques.

Les processus complexes qui conduisent à la formation des sols, leur survivance et leur dégradation, demeurent encore mal compris. L'omniprésence du biologique dans les sols, avec une biodiversité encore largement méconnue et son couplage avec les processus physicochimiques du milieu, font des sols des systèmes vivants à part entière, particulièrement complexes.

Seule une approche intégrative, pluridisciplinaire, emboitant les échelles d'espace et de temps, de la molécule au paysage, et des millions d'années à la seconde, est à même de nous permettre de comprendre et de nous apprendre, à terme, comment préserver et régénérer cette ressource.

Lors de sa soixante-huitième session, l'Assemblée générale de l'ONU a déclaré l'année 2015 « Année internationale des sols ». L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a été désignée pour mettre en œuvre l'Année internationale des sols 2015, dans le cadre du partenariat mondial sur les sols, en collaboration avec les gouvernements et le secrétariat de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification.

Dans ce contexte, le CNRS, acteur majeur de l'étude pluridisciplinaire des sols, a lui aussi souhaité prolonger sa prospective menée en 2013 sur les surfaces et interfaces continentales, par un focus particulier centré sur les sols.

Le *Réseau Thématique Pluridisciplinaire « Sol »*, animé par Christian Valentin et regroupant les communautés scientifiques travaillant sur les sols au CNRS et chez ses principaux partenaires institutionnels, a mené analyses et réflexions interdisciplinaires pendant deux ans pour livrer un état des lieux le plus pertinent possible, appréciant forces et faiblesses de la recherche sur les sols en France, accompagné de propositions de thématiques à développer et d'outils prioritaires dont la communauté scientifique devra se doter pour promouvoir la compréhension du fonctionnement global des sols. Ce groupe d'experts a aussi souhaité restituer une démarche originale concernant la formation, notamment pour et par la recherche, dans le domaine particulier de la pédologie.

Le résultat de ce travail constitue pour le CNRS un document de référence lui permettant d'orienter ses choix stratégiques pour servir au mieux la question majeure des sols portée par une large communauté scientifique française.

Pascale Delecluse
Directrice du CNRS-INSU

Stéphanie Thiebault
Directrice du CNRS-InEE

Principales recommandations

Le RTP Sols a identifié :

■ Trois grands domaines de recherche à privilégier par le CNRS :

- Les interactions entre composantes biotiques et abiotiques du sol pour mieux en comprendre la diversité, les dynamiques et les fonctions : accumulation/déstockage du C, rétroactions du vivant sur le sol et le climat, couplage des cycles (hydrique, biogéochimiques), productions épigée et hypogée.
- Les temps longs dans l'analyse et la modélisation des grands cycles, en établissant plus de synergie entre les communautés « Sol », « Climat » et « Paléo Environnements ». À cet égard, le CNRS doit rester attentif à combiner intelligemment des reconstructions physiques intégrées et des approches purement phénoménologiques.
- Les processus de dégradation des sols (érosion, tassement, acidification, salinisation, contamination, urbanisation...), dans les diverses composantes (agricoles, urbaines, minières, etc.) des territoires, associés aux questions de restauration des propriétés et de re-fonctionnalisation des sols, voire de reconstruction de nouveaux sols (génie pédogénétique). Ceci implique une mobilisation interdisciplinaire, comprenant les SHS, autour des sols urbains, péri-urbains et technosols.

■ Deux nécessités :

- Une **Infrastructure de Recherche** dédiée aux surfaces et interfaces continentales : l'efficacité du CNRS à s'emparer de ces questions serait amplifiée si la communauté travaillait à l'intersection entre Zones Ateliers et Systèmes d'Observation des Surfaces et Interfaces Continentales avec un dénominateur commun qui serait le long terme.
- Une modification du décret des **CNAP** en vue de renforcer cette dynamique de structuration plus globale à l'échelle du CNRS.

■ Deux priorités en matière de formation :

- Promouvoir des échanges d'enseignants et d'étudiants entre Écoles Doctorales pour renforcer des parcours « Sol » plus visibles et donc plus attractifs.
- Organiser des Écoles Thématiques du CNRS pour la formation des chercheurs et doctorants.



Rapport

Contexte

■ Analyse des réflexions et de projets dans le domaine des sols

• En France

Documents

Sans que la liste en soit exhaustive, plusieurs documents institutionnels ont été récemment publiés en France sur les sols :

- Comité National Français de l'Année Internationale de la Planète Terre, 2007. Le sol, épiderme vivant de la Terre. 15 p.
- BIMAGRI, 2008. Écosystèmes : comprendre la nature des sols. Le magazine du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. 1531 (3) : 18-26.
- INRA, 2009. Le sol. Dossier INRA, 183 p.
- GIS-SOL, 2011. L'état des sols de France. Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, 188 p.
- Géosciences, 2014. Les sols. La revue du BRGM pour une Terre durable, 18, 100 p.
- Agence Nationale pour la Recherche, 2014. Quelles recherches sur les sols agricoles ? Direction du développement, de l'information et de la communication, ANR, 23 p.

CNRS

Ce RTP Sols constitue une première réflexion conduite par le CNRS centrée sur les sols, depuis plus de vingt ans, si l'on fait exception des travaux plus généraux menés à l'occasion des prospectives respectives du domaine Surfaces et Interfaces Continentales du CNRS-INSU et du CNRS-InEE, et des préparations d'appels à projets du CNRS-INSU, comme PROSE et PNSE qui ont précédé le programme CNRS EC2CO « Ecosphère continentale et côtière ».

Alliance pour l'Environnement - AllEnvi

Dès la constitution du groupe de travail 1 (GT1) « Agroécologie et Sol » en juin 2010, il est apparu qu'il ne prenait en compte que les composantes biologiques du sol, réductibles à sa seule fonction de production agricole. C'est pour répondre à la nécessité d'appréhender la diversité des fonctions du sol qu'a été lancé dès octobre 2010, avec l'accord d'AllEnvi, un sous-

groupe Sol qui comme en témoigne sa composition assure une meilleure couverture disciplinaire.

Le groupe de travail GT1 « AgroÉcologie et Sol »¹ comprend 21 membres². Le sous-groupe sol, relié formellement au GT, jouit depuis d'une grande autonomie ; il agit comme force de propositions vis-à-vis d'AllEnvi et de l'ANR. Ce sous-groupe comprend 24 membres³.

Ce sous-groupe « Sol » considère comme prioritaires six grands thèmes de recherche :

- Formation versus destruction des sols - sol-ressource
- Diversité et hétérogénéité spatiales des sols
- Cycles biogéochimiques du carbone, des éléments majeurs, traces et contaminants
- Services écologiques des sols, sol-habitat
- Conservation, restauration, dépollution et décontamination des sols
- Rôle des sols (nature et états) dans les conflits d'usage et les migrations⁴

Ainsi que trois grandes questions transversales :

- Modélisation : effort d'intégration des processus biologiques, chimiques et physiques
- Observation et expérimentation à l'échelle des constituants réactifs des sols (échelles micro à nanométrique)
- Observation et expérimentation à long terme

Agence Nationale pour la Recherche

À la demande du Comité scientifique Environnement et Développement Durable de l'ANR, du Comité de pilotage du programme AgroBiosphère et de l'Alliance AllEnvi, l'ANR a entrepris une consultation scientifique prospective afin d'identifier les thèmes de recherche les plus pertinents en fonction des questions qui se posent dans la société et dans les milieux scientifiques et techniques. Deux journées de séminaire ont rassemblé 27 scientifiques, invités *intuitu personae*, dont 12 appartenaient à des UMR dans lesquelles le CNRS est associé : Jacques Berthelin, François Chabaux, Claire Chenu, Emmanuel Doelsch, Jérôme Gaillardet, Gérard Gruau, Lucile Jocteur-Monrozier, Catherine Keller, Xavier Le Roux, Christophe Schwartz et Christian Valentin.

1 - <http://www.allenvi.fr/thematiques/agroecologie-et-sol/enjeux>

2 - Dont quatre nommés par le CNRS :

- Françoise Burel, ECOBIO, Rennes, Écologie
- Aline Dia, Géosciences Rennes, Rennes, Géochimie
- Jean-Louis Martin, CEFE, Montpellier, Ecologie
- Pascal Simonet, Ampère, Lyon, écologie microbienne.

3 - Dont les membres suivants d'unité CNRS :

- François Chabaux, LHyGeS, Strasbourg, Géochimie
- Jérôme Gaillardet, Institut de Physique du Globe, Paris, Géochimie
- Gérard Gruau, Géosciences Rennes, Rennes, Géochimie

• Catherine Keller, CEREGE, Aix en Provence, Science du sol

• Corinne Leyval, LIEC, Vandoeuvre les Nancy, Science du sol

• Oumarou Malam Issa, GEGENA², Reims, Science du sol

• Pascal Simonet, Ampère, Lyon, écologie microbienne, membre aussi du GT1

• Christian Valentin, iEES, Paris, Science du sol, membre aussi du GT1, animateur du sous-groupe.

4 - Ce thème est notamment abordé en lien avec le GT10 Territoires d'AllEnvi.

http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/documents/2015/ANR_Plaquette_SOLS.pdf

Les résultats de cette consultation sont disponibles en ligne depuis janvier 2015⁵. Ils s'articulent selon quatre grands thèmes :

Le sol vu comme un patrimoine à gérer : formation-dégradation ; gérer la pédogenèse ; contrôler les menaces sur les sols (érosion, urbanisation, contamination, salinisation).

Le sol vu comme un lieu de multifonctionnalité. Le terme « multi-fonctionnalité » signifie que le sol assure des fonctions multiples. Le cycle du carbone dans les sols et flux de gaz à effet de serre ; la fertilité des sols et le cycle des éléments minéraux ; comment optimiser le fonctionnement racinaire et des zones d'interface ? ; comment enrichir la biodiversité des sols ?

Le sol vu comme un lieu de pratiques productives. Dans la perspective d'une simplification du travail du sol, comment les pratiques relatives aux sols peuvent-elles garantir un milieu favorable aux cultures ?

Outils, méthodes et modèles : quelles nécessités ? La question de la connaissance de la diversité spatiale des sols reste centrale, avec le besoin de nouvelles métrologies de caractérisation des sols et de cartographie numérique. Il est ainsi mis en avant l'utilité des systèmes d'observation afin de documenter les pratiques d'usage des sols sur des périodes longues. Pour cela, il apparaît nécessaire de continuer à s'appuyer sur des Services d'Observation et SOERE multi-sites, instrumentés et soutenus autant que nécessaire afin de donner plus de généralité. Développer la modélisation de ces objets éminemment complexes, y compris avec des démarches de type « sol virtuel », en s'efforçant de tenir compte de la diversité des sols et des processus qui y prennent place. La représentation des sols, actuellement très pauvre dans différentes modélisations devrait être améliorée, par exemple dans les modèles climatiques globaux comme dans les modèles économiques à caractère décisionnel. Il y a nécessité de mettre en place des dispositifs de suivi de l'état des sols, de leur bilan genèse/érosion, de leur teneur et stock de carbone et de leur émission de GES avec les instrumentations nécessaires à différentes échelles.

Par ailleurs, l'ANR a organisé les 9 et 10 décembre 2014, un colloque de bilan 2005-2013 : « Agricultures et écosystèmes : du développement durable aux changements globaux. Des programmes thématiques pour impulser des recherches nouvelles ? » dont les présentations sont disponibles⁶. Une

session, consacrée aux sols, a porté sur l'analyse de sept projets à dominante « sol ». Il apparaît que l'ensemble de ces projets s'est appuyé sur des dispositifs de suivis à long terme (SOERE RBV, ou autres). Deux autres conclusions ont été tirées :

1) Une attention particulière doit être portée aux sols : ils constituent des éléments clefs de la « zone critique », et à la variabilité dynamique de leur structure et fonctionnements (micro)-biologique, physique, géochimique à différentes échelles emboîtées d'espace et de temps.

2) Il importe de mener des études sur les services écosystémiques rendus par les sols :

- cycles biogéochimiques pour lesquels les sols constituent un élément clef ;
- régulation du climat : émissions de GES (N₂O, CO₂) par les sols ;
- gestion de l'eau : interactions sols / eaux dans la zone critique ;
- transition vers l'agroécologie : biodiversité dans les sols.

EC2CO

L'analyse a porté sur les résumés des projets financés en 2011, 2012 et 2013. Le premier constat est que la part des projets ayant trait au sol est loin d'être négligeable (Fig. 1)

Les projets retenus illustrent bien la variété des domaines abordés, par exemple :

- Biogéochimie du carbone et des éléments en traces dans les pergélisols des grands bassins basaltiques sibériens : variabilité spatio-temporelle ;
- DESTOC : Impact des pratiques agricoles sur le déstockage du carbone organique ;
- SUBMERSOIL - Cycles hydrologique et biogéochimique (redox) dans les sols de la zone de marnage du réservoir Nam Theun II (sud Laos) ;
- Les nanoparticules métalliques dans les écosystèmes terrestres : écodynamique et impact sur les communautés bactériennes dans les sols ;
- Effet des herbivores sur le fonctionnement de la strate herbacée et le recyclage des nutriments.

Les 45 projets « Sols » se répartissent selon cinq grands domaines⁷ :

- Contaminants : 20 (45 %)
- Dynamique de la MO : 18 (41 %)
- Écologie fonctionnelle – rôle des organismes : 18 (41 %)
- Géochimie/isotopie : 17 (39 %)
- Hydrologie : 12 (27 %)

5 - http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/documents/2015/ANR_Plaquette_SOLs.pdf

6 - <http://colloqueanr-agroecologie.fr/>

7 - La somme est supérieure à 100, de nombreux projets abordant plus d'un thème.

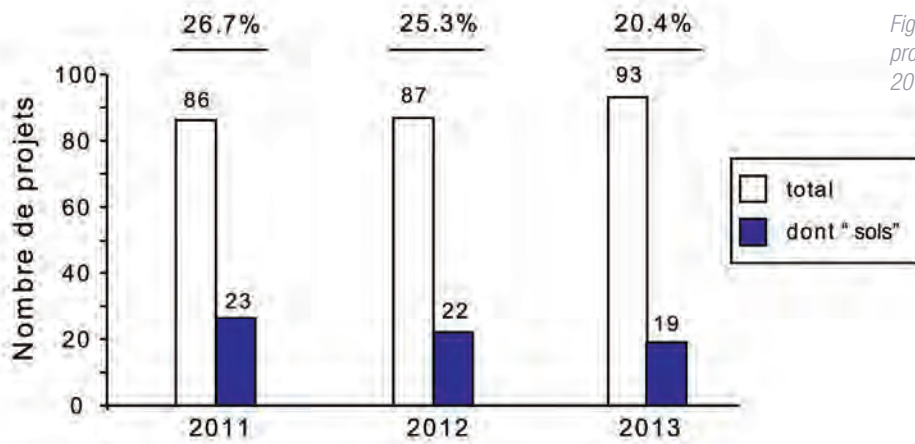


Figure 1. Part des projets « Sols » dans les projets EC2CO financés en 2011, 2012 et 2013.

Au demeurant, 11 % des projets sont inter-AT (Actions Thématiques) du programme EC2CO. La répartition par AT (Fig. 2) fait apparaître une prédominance, assez logique, de l'AT Biohefect « BIOgéochimie, HydrologiE et Fonctionnement des ECosys-Tèmes ».

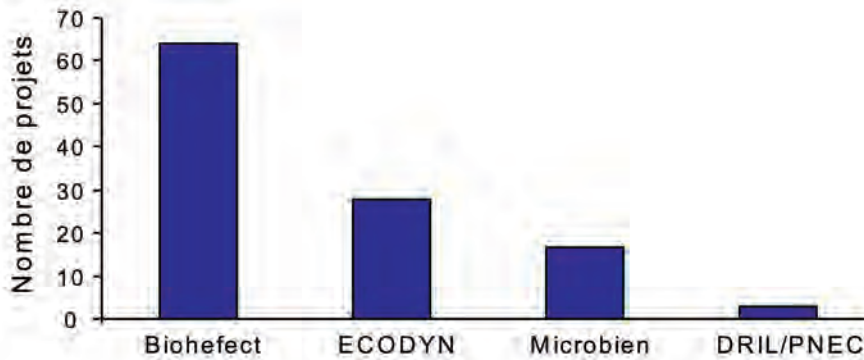


Figure 2. Distribution des projets « Sols » en fonction des AT (en %).

Il serait hasardeux de tirer des conclusions de la Fig. 3 quant à la réduction des porteurs CNRS, entre 2011 et 2013, d'autant que les collaborations intra- et inter-UMR favorisent les collaborations avec les universités et les autres organismes.

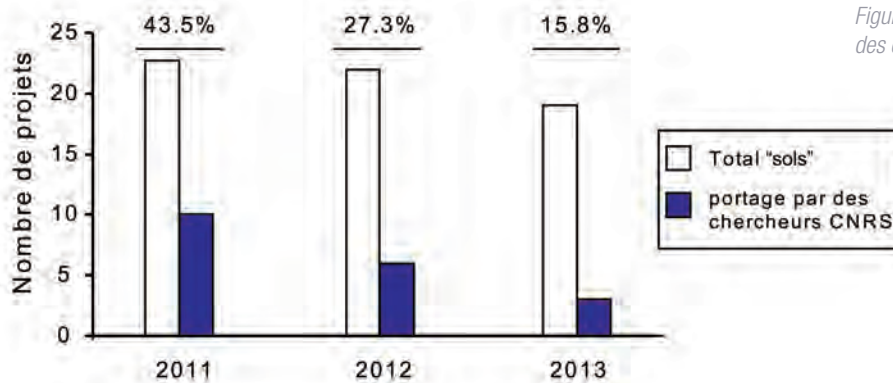


Figure 3. Partage des projets « Sols » par des chercheurs CNRS.

La distribution de projets « Sols » retenus pour neuf UMR semble assez bien refléter leur implication dans ce thème (Fig. 4). Toutefois, 17 autres laboratoires ont été porteurs d'un projet au cours des trois années considérées.

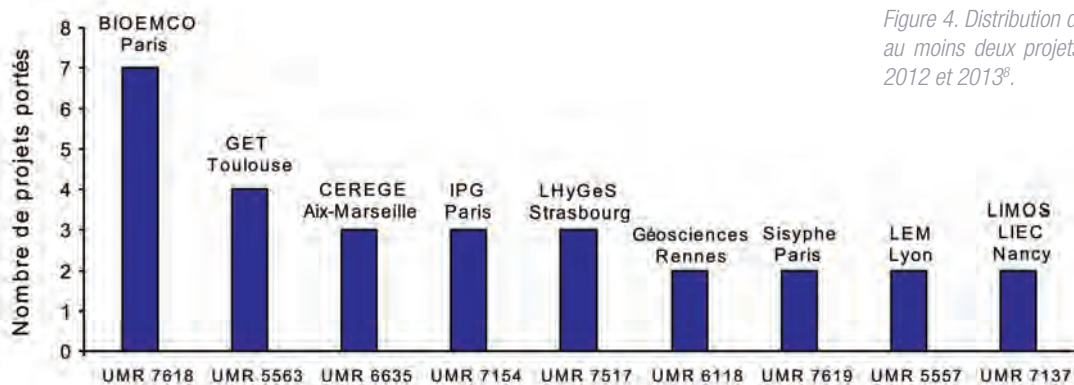


Figure 4. Distribution des UMR ayant porté au moins deux projets retenus en 2011, 2012 et 2013⁸.

Il ressort des réflexions menées par l'ANR, ainsi que des analyses des projets retenus dans le cadre de EC2CO, que les sols constituent ainsi une zone de confluence de disciplines multiples : pédologie, sédimentologie, géomorphologie, géochimie, hydrodynamique, physique des matériaux, écologie, biologie, agronomie, archéologie, génie civil, économie, droit, etc. À cet égard, le CNRS détient de très solides atouts.

GESSOL

En réponse à la pression croissante exercée par l'homme sur les sols, le ministère en charge de l'écologie a lancé en 1998 le programme de recherche GESSOL « Fonctions environnementales et GESTion du patrimoine SOL ». Ce programme a eu ainsi pour objectif de structurer une communauté de recherche sur la gestion des sols, de fournir aux décideurs publics et aux usagers des sols des connaissances et des outils opérationnels pour évaluer, surveiller, gérer, voire améliorer la qualité des sols, qu'ils soient naturels, agricoles ou urbains. Il s'achève en 2015 sous la forme d'un colloque final, le 28 avril 2015, à Marne-La-Vallée, <http://www.gessol.fr/content/colloque-final-gessol>. Les différentes sessions de ce colloque illustrent bien la variété des thèmes abordés dans les projets financés :

- Une diversité de perceptions des sols par les acteurs du territoire ;
- Sols et régulation du climat ;
- Sols et préservation de la biodiversité ;
- Les sols comme archives ;
- Eau et contaminants : gestion de la fonction de filtration des sols ;
- Remédiation et réutilisation des sols pollués ;
- Pratiques et outils pour une gestion durable des sols agricoles ;
- Affectation et gestion des sols : instruments de politiques publiques.

• À l'international

Un regain d'intérêt

Secteur longtemps délaissé par les décideurs, la recherche et la formation, le domaine des sols remonte dans les agendas internationaux, sous le double effet des questions d'atténuation des changements climatiques par séquestration du carbone par les sols, et de la sécurité alimentaire associée à la pression sur les terres (poussée démographique, urbanisation, mais aussi cultures non alimentaires, notamment agro-énergétiques, question d'accaparement des terres). En témoignent à des degrés divers le lancement en septembre 2011 du « Global Soil Partnership » par la FAO en réponse à la problématique de la dégradation des sols à l'échelle globale.

Depuis novembre 2012 se tient annuellement à Berlin la « Global Soil Week », à l'image de la « World Water Week » de Stockholm. Ce regain d'intérêt se manifeste aussi par la proclamation du 5 décembre « Journée Internationale des Sols », et de 2015 « l'Année Internationale des Sols » (AIS) par la 68^e Assemblée générale des Nations Unies. La FAO a été choisie comme organisme responsable pour la mise en œuvre de l'AIS, dans le cadre du Partenariat Mondial sur les Sols, en collaboration avec les gouvernements et le secrétariat de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. Officiellement, l'AIS, année de sensibilisation, vise donc à accroître la compréhension de l'importance des sols pour la sécurité alimentaire, ainsi que ses fonctions essentielles au sein de l'écosystème. Les sols jouent un rôle crucial dans la sécurité alimentaire, l'éradication de la faim, l'adaptation au changement climatique, la réduction de la pauvreté et le développement durable. ». À l'occasion de l'AIS, vient notamment de paraître « *International Year of Soils 2015 – Soil Atlas: Facts and figures about earth, land and fields* »⁹.

8 - L'UMR BIOEMCO est devenue l'UMR IEES au premier janvier 2015.

9 - Heinrich-Böll-Stiftung, avec Institute for Advanced Sustainability Studies, Friends of the Earth Germany et Le Monde diplomatique. Disponible en anglais et en allemand, notamment : European Commission's soil webpage

L'émergence du concept : sol – élément clef de la zone critique

Alors que fidèle à la tradition russe, le sol est considéré par les chercheurs européens comme compris entre sa surface jusqu'à la roche saine, la définition américaine est plus marquée par le Département d'Agriculture (USDA) et donc beaucoup plus restrictive : elle s'arrête souvent au premier ou aux deux premiers mètres de sol « arable ». Pour donner une acception plus large du sol, le National Council of Science des États-Unis a donné le nom de « Zone Critique (Critical Zone) » à la mince pellicule de la planète comprise entre les roches et la basse atmosphère (Fig. 5). Cette zone, qui est le milieu de vie de l'humanité d'où elle tire ses ressources alimentaires et énergétiques et où elle stocke ses déchets, comprend le sol tel que nous l'avons défini plus haut mais l'englobe dans un système plus vaste comprenant les aquifères et l'écosystème. Ce concept se veut unificateur dans le sens où la zone critique est le point de rencontre de plusieurs disciplines, dont la pédologie, et parce qu'on ne peut s'intéresser au sol sans prendre en considération la biodiversité associée, les échanges gazeux avec l'atmosphère, la circulation de l'eau et ses stocks, ou bien encore l'évolution des reliefs et l'érosion mécanique. L'adjectif de « critique » souligne à quel point cette zone est importante pour la vie de la planète et comment comprendre son évolution dans les siècles à venir est crucial. Nés aux États-Unis sous l'impulsion de la NSF et du NSC, des observatoires de la zone critique se sont développés et sont en train de se généraliser aux autres pays du monde. Ces observatoires de la zone critique disposent d'une composante sol très développée. La commission européenne a financé dans le cadre du FP7 un programme sur la zone critique appelé « SoilTrek » qui met en réseau divers observatoires de sols et de bassins versants en Europe (coordinateur S. Banwart) et appuie la constitution d'infrastructures fédérant les approches « milieu et vivant » sur la zone critique.

Lors de la réunion AGU (American Geophysical Union) de San Francisco de décembre 2013, six thèmes « Swirl » (remous, tourbillons) ont été mis en avant :

- Carbon Dioxide Sequestration ;
- Characterizing Uncertainty ;
- Dust and Aerosols ;
- Computational Methods across Scales: from Personal to High Performance Platforms ;
- Global Soils ;
- Urban Systems.

Ainsi les sols (au pluriel) sont bien identifiés comme l'un des grands thèmes émergents. Notons également, qu'ils se trouvent aussi présents dans les cinq autres grands thèmes.

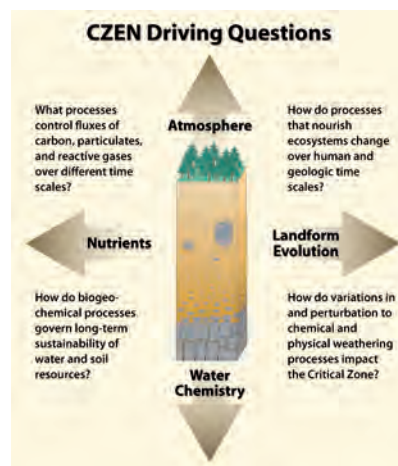


Figure 5. Le sol, élément clef de la zone critique, en interactions avec l'atmosphère, les cycles biogéochimiques, la qualité des eaux et l'évolution des paysages. <http://www.czen.org/>.

Le thème « Global Soils » est résumé ainsi :

'Soils are part of the Critical Zone, and are both responders and drivers of the most critical environmental changes facing the Earth during the Anthropocene. Controls on soil organic matter and C-cycling processes have dominated these discipline-specific sessions. The soils SWIRL accounts for all aspects of the complexity of the soil system including erosion, dust production, soils in water transport and chemistry, isotopic analyses, pedogenic processes affected by volcanism, physical, chemical and biological composition, fertility, greenhouse gas production, and weathering. The soils SWIRL theme will provide bridges of interdisciplinarity and communication across the AGU membership to characterize and quantify soil processes from microbial to pedogenic scales'.

Les animateurs du RTP Sols considèrent qu'au-delà des questions de définition de la zone critique qui peuvent différer d'un pays à l'autre, il s'agit bien d'une zone de très forte interdisciplinarité associant notamment les grands domaines de l'environnement et de l'écologie. À cet égard, il revient à la France, et notamment au CNRS d'harmoniser ses dispositifs de suivis à long terme (SNO, ORE, SOERE, ZA...). Outre ces aspects disciplinaires, la différence avec les LTER américains réside non seulement sur le volume de leur financement, mais aussi, voire surtout, sur l'assurance de leur pérennité.

8 - L'UMR BIOEMCO est devenue l'UMR IEES au premier janvier 2015.

9 - Heinrich-Böll-Stiftung, avec Institute for Advanced Sustainability Studies, Friends of the Earth Germany et Le Monde diplomatique. Disponible en anglais et en allemand, notamment : European Commission's soil webpage

Dans l'objectif d'associer la communauté française de la zone critique (qui englobe celle des sols) à cette dynamique internationale, le sous-groupe Sol d'AllEnvi a fait remonter en 2014 l'idée de lancer un appel à projets Belmont Forum dédié à la zone critique. Bien que portée internationalement par le Président d'AllEnvi¹⁰, cette initiative n'a pas été retenue par le Belmont Forum. Une nouvelle tentative devra être effectuée en 2015, probablement dans le cadre plus large de Future Earth.

■ Les atouts du CNRS

• Effectifs

Comme nous le verrons plus loin lors de la tentative d'analyse bibliométrique, il est assez difficile de dresser une liste précise et exhaustive de la communauté «sol» au sein des UMR dont le CNRS est partenaire (ci-après désignées simplement par «UMR CNRS»). Si certaines unités et équipes affichent claire-

ment le terme «sol» dans leur titre, celui-ci est abordé par de très nombreuses autres équipes, de disciplines diverses et de manière diffuse. Les estimations suivantes représentent dès lors des sous-estimations assez grossières. Elles permettent toutefois d'identifier les UMR les plus impliquées dans le domaine «Sol», ainsi que la distribution par région des effectifs ainsi évalués.

Un peu plus de 40 UMR CNRS (42) avec un effectif proche de 400 (393) ont été identifiées. D'après des évaluations entreprises par le sous-groupe «Sol» d'AllEnvi, il représente plus de la moitié de l'effectif national de recherche dans ce domaine.

Nous avons arbitrairement distingué les 15 unités à $n \geq 10$ (Fig. 6), et les 18 unités à $5 \leq n < 10$ (Fig. 7). Les 9 autres UMR à $n \leq 4$ sont Institut des Sciences du Végétal-Gif, Géosciences-Montpellier, Géosystèmes-Lille, Biogéosciences-Dijon, LETG-Angers LEESA, ESO - Espace et Sociétés, M2C-Caen, Epec-Bordeaux et OPG-Clermont Ferrand.

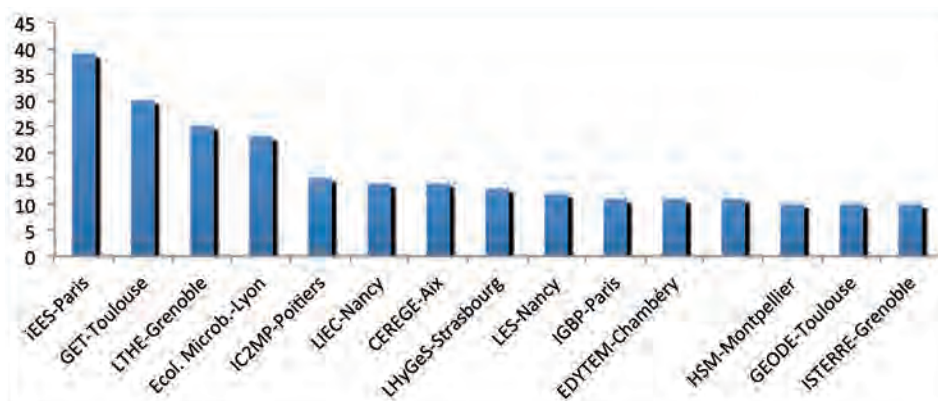


Figure 6. Unités où les effectifs «Sol» estimés égalent ou excèdent 10 scientifiques.

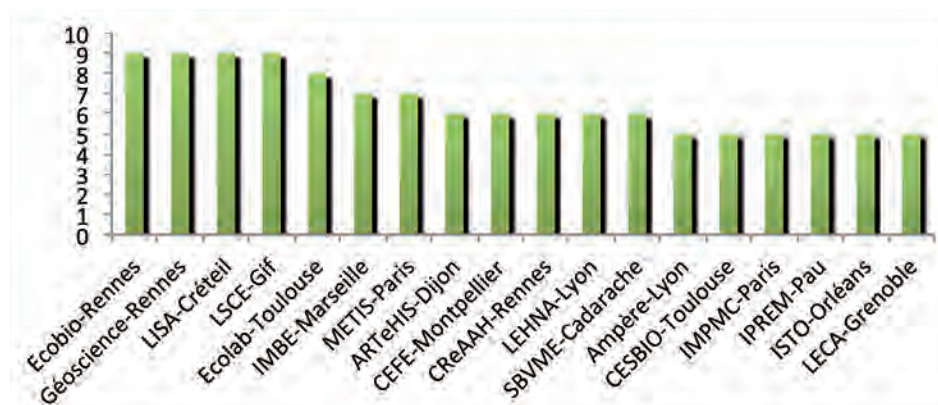


Figure 7. Unités où les effectifs «Sol» sont estimés entre 5 et 10.

10 - François Houllier, Président de l'INRA.

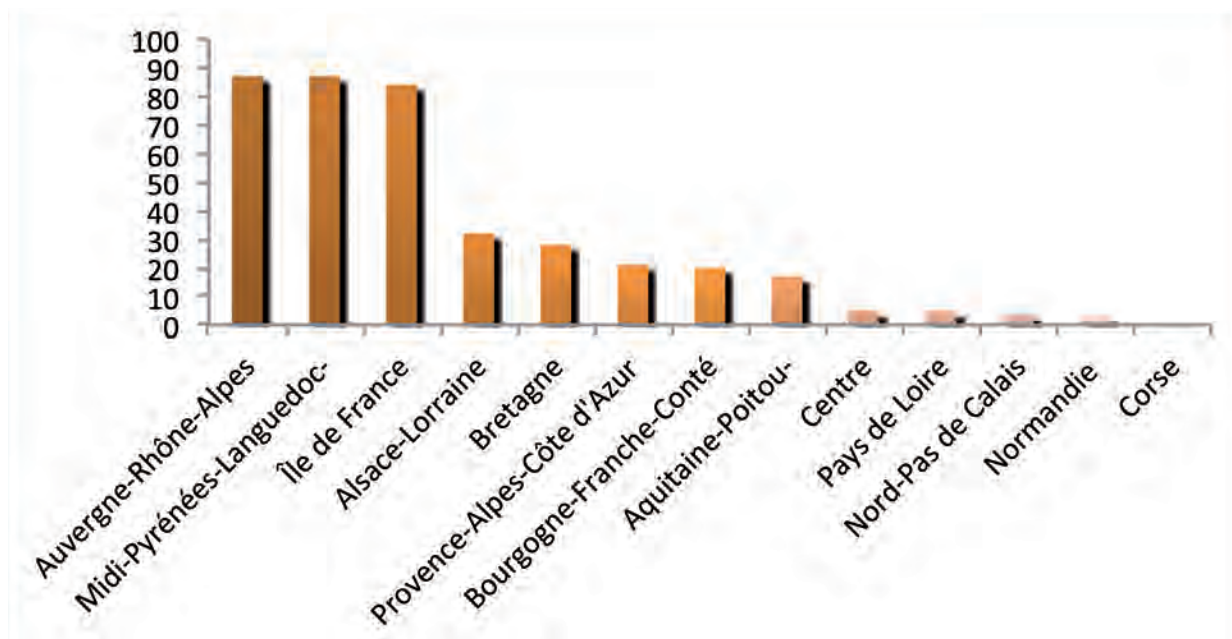


Figure 8. Effectifs « Sol », estimés par région métropolitaine.

Les nouvelles régions Auvergne-Rhône-Alpes et Midi-Pyrénées-Languedoc-Roussillon (Fig. 8) devraient favoriser l'émergence de synergies régionales analogues à celle de l'Île de France où les effectifs « Sol » sont regroupés dans la Fédération d'Île de France de Recherche en Environnement (FIRE). Quatre régions présentent également des possibilités importantes de coopération régionale : Alsace-Lorraine, Bretagne, PACA, Bourgogne-Franche Comté, et Aquitaine-Poitou-Charentes. En revanche, cinq régions métropolitaines ne détiennent que des effectifs limités : Centre, Pays de Loire, Nord-Pas de Calais, Normandie et Corse. Le CNRS ne dispose d'aucune unité « Sol » dans les Outre-Mer.

Cet inventaire, bien que très imparfait, fait apparaître que :

- Le nombre de chercheurs et enseignants-chercheurs des unités CNRS menant des travaux dans le domaine des sols est plus élevé que celui que pourrait laisser supposer sa visibilité institutionnelle.
- Le maillage géographique est assez satisfaisant (Fig. 9) si l'on fait exception de « déserts » comme la Corse et les Outre-Mer, et de quatre régions dont les effectifs « Sol » du CNRS demeurent sûrement trop faibles en regard des enjeux régionaux dans ce domaine : Centre, Pays de Loire, Nord-Pas de Calais, Normandie.

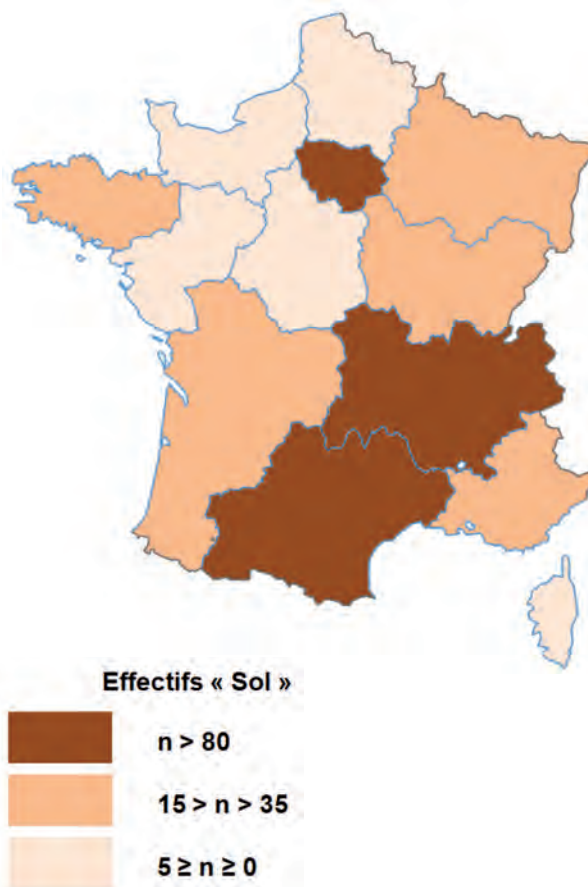


Figure 9. Disparité régionale des effectifs « Sol » estimés.

• Partenariats

Sans surprise, les universités (23 pôles universitaires) constituent le premier partenaire des UMR travaillant sur les sols. Les autres partenaires sont d'autres organismes de recherche : l'IRD (8 unités), l'INRA (4), l'INRAP (3), le CNES (2), le BRGM (1), le CEA (1), le CIRAD (1) et l'IFFSTAR (1) ; et d'enseignement supérieur : le Collège de France, l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers (ENSIP), l'ENGEES (Strasbourg), l'ENSAIA (Nancy), l'ENTPE (Lyon), l'INP-G (Grenoble), l'INP-Toulouse, l'ISARA (Lyon) et Vet-Agro Sup (Lyon).

Les collaborations avec l'INRA, l'IRSTEA, les Travaux Publics se nouent davantage à travers des Fédérations de Recherche et les OSU que *via* les UMR. Ce genre de lien avec une communauté INRA très structurée sur le sol pourrait permettre au CNRS de se positionner sur cette question dans le paysage national, mais en mettant en avant ses atouts et missions spécifiques. Ce type de rapprochement de compétences et disciplines, pourrait contribuer à la structuration de notre communauté nationale « Sol »/« Zone Critique »/« Zone Atelier » ; véritable réseau national de compétences et d'échanges permettant de renforcer sa place au niveau international.

• Publications

Une analyse bibliométrique a été réalisée via le Web of Science avec les mots-clés « France » dans adresse et « Soil » dans topic. De cette analyse, il ressort un certain nombre de points parmi lesquels :

- Comme l'avait montré précédemment l'étude bibliographique d'AllEnvi en 2011 (période 2006-2010), le CNRS se classe premier producteur de recherche dédiée au sol également sur le long terme (1970-2013). Ses principaux domaines de recherche du CNRS et de ses principaux partenaires, notamment l'INRA, ne sont pas les mêmes. L'INRA publie majoritairement dans le domaine « Agriculture », alors qu'au CNRS le premier domaine est : « Environmental Sciences Ecology » (Tab. 1).

- L'approche « Géosciences » constitue un élément de singularité du CNRS. La Géologie s'empare du sol au CNRS entre 2008 et 2013 avec une part agriculture qui tend à diminuer au CNRS entre 2008 et 2013 (Tab. 2).

Sur cette période 2008-2013, les articles les plus cités portent sur le cycle du carbone, l'écologie évolutive et l'écologie fonctionnelle. Dans les cinq premiers domaines, les articles les plus cités portent :

- Environmental sciences – Ecology : les services écosystémiques, la microbiologie et les grands cycles, souvent associés à de grandes bases de données, à la modélisation et à la télédétection
- Geology : les grands cycles (H₂O, CH₄, C, N, Fe) et la géomorphologie (érosion côtière-tsunami)
- Agriculture : les grands cycles (C, N) et les déchets.
- Ingénierie : hydrologie, aléas-climat, nano-métaux, géotechnique, grands cycles (Hg)
- Géochimie, géophysique : sols martiens, grands cycles (C), microchimie, volcans

UMR CNRS	INRA
Environmental sciences ecology (1,817)	Agriculture (2,997)
Agriculture (1,345)	Environmental sciences ecology (1,346)
Geology (1,203)	Plant sciences (993)
Engineering (752)	Forestry (500)
Geochemistry geophysics (587)	Geology (417)

Tableau 1. Cinq principaux domaines de publication « Sols » des deux principales institutions françaises (1970-2013)¹¹

1970-2013	2008-2013
Environmental Sciences Ecology (1,817)	Environmental Sciences Ecology (880)
Agriculture (1,345)	Geology (595)
Geology (1,203)	Agriculture (496)
Engineering (752)	Engineering (406)
Geochemistry Geophysics (587)	Geochemistry Geophysics (272)

Tableau 2. Évolution des domaines de publication « Sols » du CNRS au cours des 6 dernières années

¹¹ - Source pour les tableaux 2 et 3 : ISI Web of knowledge, « soil » comme sujet (« topic »)

À travers les articles les plus cités du « topic Soil », le sol apparaît ainsi pour le CNRS comme :

- L'élément de contrôle des « grands cycles » (C, nutriments, H₂O, contaminants) et par voie de conséquence de l'atténuation/adaptation aux changements climatiques ;
- Le lien entre biodiversité et « services écosystémiques » ;
- Un enjeu important pour la gestion des déchets ;
- Un objet support de recherche innovante (génétique, microbiologie, microchimie, géophysique).

Il ressort aussi de cette analyse que le nombre de citations reste « raisonnable » pour tous et que pour les auteurs les plus cités, ces articles sur le sol ne correspondent qu'à une petite partie de leurs publications. Beaucoup de chercheurs publient sur le sol, mais peu le définissent comme leur sujet de recherche, d'où la difficulté de définir les effectifs (*cf. supra*). Les chercheurs du CNRS mettent en avant les mécanismes étudiés plutôt que les objets d'étude (milieux).

Cette étude présente toutefois de sérieuses limites puisque l'objectif est resté non normatif, tous les domaines n'ayant pas le même poids. De plus, de grands champs de recherche échappent à cette analyse bibliométrique « sols » : érosion, altération, interactions sols-société, fonctions d'héritage et de mémoire des sols, suivi environnemental (SOERE)... En d'autres termes, la codification « soil » du WoS est trop restrictive et ne fournit qu'une estimation très minorée des travaux menés par le CNRS dans ce domaine.

Il faudrait sans doute faire traiter la question par l'INIST pour être plus exact d'un point de vue quantitatif. Il reste que l'étude est significative qualitativement.

Priorités de recherche

Les échanges entre les animateurs du RTP et avec les participants au colloque des 7 et 8 octobre 2014 (cf. document en fin de rapport) ont fait apparaître un certain nombre de verrous à lever, scientifiques, méthodologiques ou instrumentaux, concernant la connaissance du fonctionnement et de la dynamique spatiale et temporelle des sols. Ils constituent autant de priorité de recherche.

■ Sol - Milieu vivant

- L'identification du lien entre diversité biologique et fonctionnement des sols, avec le prérequis d'une meilleure connaissance du vivant dans les sols.
- L'évolution du fonctionnement biologique du sol à différents pas de temps.
- Il faut préciser la définition la plus appropriée du terme « Qualité des sols » pour quel « service » : diversités et fonctions biologiques des sols.
- La prise en compte des rétroactions du vivant sur le sol et donc le climat puisque le sol est un objet d'intérêt majeur au regard de ses interactions avec le climat via le cycle du C.
- Le rôle des apports organiques sur la structuration spatiale des sols, sur les communautés microbiennes et donc l'écodynamique et la biodisponibilité des contaminants.
- La mise en œuvre de nouvelles techniques d'isolement/cultures des organismes du sol en complément des techniques omiques afin de répondre à la question précédente et de développer de véritables approches d'ingénierie écologique associant les microorganismes.
- La représentativité des analyses et la caractérisation de certains compartiments de la matière organique des sols (hydrophile, azotée).
- La difficulté de l'appréhension de l'hétérogénéité du sol ; limite des outils d'échantillonnage des micro-organismes (diversité) : analyse de la présence et de l'expression génique de bactéries *in situ*.

■ Dynamiques spatio-temporelles

- La hiérarchisation de l'importance des processus observés dans le temps et dans l'espace (« moments clefs » / « lieux clefs »).
- Une meilleure prise en compte du facteur temps, et notamment les constantes de temps des processus de formation et de dégradation des sols y compris les temps longs.

- Les lieux et jeux des réactions d'altération dans le milieu naturel avec une prise en compte de l'extension verticale des réactions d'altération (géométrie des structures d'altération, propagation dans l'espace et dans le temps).
- Les mécanismes contrôlant la propagation des fronts d'altération, et les limites de la zone active en termes de processus et de flux.
- La prise en compte de l'héritage et le poly-phasage des processus de formation des sols.
- Les cinétiques de séquestration et libération des contaminants dans les sols et aux interfaces Sol/Eau/Biosphère.

■ Sols contaminés

- La question de la recherche de processus fondamentaux dans des situations de terrain avec des pollutions historiques assorties de faibles disponibilités.
- La compréhension de la dynamique des contaminations multiples impliquant des multi-stress (nutritionnel, changement climatique, salinité, dégradation physique).
- Les indicateurs, capteurs environnementaux, bio-senseurs *in situ* à développer, et surtout comment et avec quels types de nouveaux partenaires que ceux de notre communauté.
- L'identification des rôles respectifs des processus biotiques et abiotiques dans le devenir des contaminants dans les sols.
- L'optimisation des processus de remédiation.
- Le rôle précis du transfert accéléré des polluants par les colloïdes (bactéries, matière organique, argiles...) dans les sols et vers les autres compartiments de l'écosystème (ex : eaux souterraines).
- La prise en compte des interactions physiques et/ou chimiques des polluants avec le milieu qui entraînent une réduction ou une augmentation de leur dynamique.
- L'identification de contaminants émergents (composés organiques fluorés ou bromés, nanoparticules manufacturées...) et de leurs impacts directs ou indirects (type Cheval de Troie) sur les sols.

■ Expérimentations

- Le problème du traitement et de la centralisation des données : base de données « sols » ?
- Le développement des dispositifs de suivi de l'état de santé des sols, de leur bilan genèse/érosion, de leur charge en carbone et de leurs émissions des gaz à effets de serre avec les instrumentations nécessaires, et ce, à différentes échelles (si les études à micro-, à la nano-échelle et aux plus grandes échelles existent, il manque l'analyse de la méso-échelle).
- La notion de « Sol de référence » ?
- La formation accélérée des sols (ingénierie pédogénétique) et des écosystèmes associés.

■ Modélisation

- La représentation du vivant (structure, dynamiques, interactions et fonctions) dans les modèles.
- La représentativité des processus identifiés et l'extraction potentielle sous-jacente de lois globales.
- Améliorer la représentation, jusqu'ici bien trop simpliste, des sols dans des modèles globaux.
- La prise en compte des distributions verticales du C dans les modèles.
- Définir des indicateurs qualifiant les sols pour les modèles économiques à caractère décisionnel.
- La modélisation des interactions polluants/sols/microorganismes/eau.

■ Points chauds

Deux points chauds ont été particulièrement identifiés.

• Matière organique et cycle du carbone

La matière organique des sols nécessite d'être caractérisée sur le maximum de compartiments possibles (différents poids moléculaires de lipides, fractions séparées physiquement) et les résultats obtenus à différentes échelles doivent être confrontés. Il faut aussi encourager l'émergence des mesures *in situ* pour l'obtention d'informations moléculaires permettant une analyse précise des processus mis en jeu. L'enjeu est d'importance car il s'agit de disposer des prérequis essentiels pour

prédire la dynamique et la réactivité de la matière organique qui est, à l'heure actuelle, trop peu intégrée dans les modèles. À travers sa réactivité, il s'agit aussi de mieux comprendre ses interactions avec d'autres éléments chimiques (ex : xénobiotiques, éléments traces métalliques ou métalloïdes), de déterminer les mécanismes de sa stabilisation, et de fournir des recommandations sur les pratiques culturales pour augmenter la fertilité des sols.

En écologie fonctionnelle, il est aussi nécessaire de considérer les pools de matière organique distincts, leurs interactions avec les processus biologiques et le compartiment minéral afin d'établir des modèles fiables de recyclage des nutriments lors de la dégradation de la matière organique dans les sols. La présence de matière organique de différentes réactivités dans les sols (ex : litières et exsudats racinaires, produits de la macrofaune) doit aussi être considérée car elle peut affecter significativement la dynamique du C à travers des mécanismes tels que le « priming effect ».

• Cycle et qualité de l'eau

Le sol constitue le compartiment central de la zone critique qui contrôle une grande partie des grands cycles dont celui de l'eau. Les propriétés du sol déterminent la partition de l'eau de pluie entre infiltration, puis stockage de l'eau dans le sol, et/ou alimentation de la nappe, ou le ruissellement générateur d'érosion et de pollutions. Il contrôle, non seulement les quantités d'eau dans les différents compartiments, en assurant l'alimentation hydrique de la végétation, mais aussi en régulant le niveau des nappes, les débits de base et les crues. L'hydrologie est dès lors indissociable de la connaissance des sols.

En contrôlant les différents chemins de l'eau, le sol contrôle aussi la qualité de l'eau, du fait de son rôle épurateur, mais aussi comme pourvoyeur de polluants vers les nappes *via* le drainage, ou les cours d'eau *via* les écoulements de surface. Ces processus ne sont pas confinés aux sols agricoles, mais aussi aux sols péri-urbains, urbains, sols de friches industrielles, sols miniers, et autres technosols, voire tous les sols.

Instruments

■ Observatoires de la zone critique et zones ateliers

La plupart des observatoires sont non seulement des lieux de suivis à long terme mais aussi d'*expérimentations*. Au demeurant, la plupart des publications issues de ces observatoires portent sur des expérimentations, plutôt que sur des suivis à long terme, parfois plus difficiles à valoriser.

La zone critique, n'est ni un concept nouveau, ni un objet scientifique nouveau mais il est fédérateur. D'un point de vue fondamental : c'est l'interface de l'atmosphère, de la lithosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère. C'est une zone de réactions caractérisée par diverses échelles de temps et d'espace. D'un point de vue appliqué, c'est la zone sur laquelle l'humanité vit, se développe, se nourrit, stocke ses déchets. C'est un réacteur bio-physico-chimique traversé par des flux de matière et d'énergie. Cette zone est une des couches critiques de la planète mais elle aussi critique car c'est notre milieu de vie et que ses équilibres ont été rompus par les activités humaines (cf. Bruno Latour, «Some advantages of the notion of Critical Zone»).

Cette zone n'est pas étudiée par une seule communauté, mais par plusieurs groupes de scientifiques qui s'y intéressent, sans nécessairement avoir tous les mêmes questionnements, ce qui constitue une difficulté, mais aussi un atout puisque la zone critique doit être le carrefour de disciplines. Une trop grande spécialisation peut représenter un obstacle à l'appréhension holistique de la zone critique.

La zone critique est traversée par un flux d'énergie et d'eau qu'il importe de mesurer sur le long terme dans des observatoires : a) pour élucider les mécanismes à l'œuvre dans la zone critique, b) pour suivre sur des temps très longs l'évolution d'un système soumis à un forçage majeur. Un réseau d'observatoires de la zone critique constitue un dispositif très riche, puisque chaque observatoire élémentaire peut être considéré comme un nœud d'un réseau plus global, qui permet de séparer les variables en jeu lorsque l'expérimentation n'est pas possible.

Tous les observatoires tendent à répondre à une question unique : savons nous modéliser, donc reproduire et prévoir la réponse de ce réacteur bio-physico-chimique qu'est la Zone Critique à des changements environnementaux dont les périodes de temps vont de la seconde au million d'années ? Les bassins versants sont représentatifs d'un ou de plusieurs

processus, ce qui suppose qu'au delà de l'hétérogénéité, il existe des propriétés émergentes. La question corollaire est donc : a-t-on choisi les bons bassins versants ? Dès lors, il est nécessaire de définir un corpus de données communes du statut d'ORE localisé à une « métrique » commune de la zone critique (mesures atmosphériques : retombées sèches et humides, paramètres climatiques, paramètres édaphiques, paramètres des eaux profondes, flux d'eau à l'exutoire (à quelle fréquence ?), mesures des flux de matières (dissous et solides), occupation des sols, caractérisation « géométrique » de nos sites. Dans le réseau des bassins versants (RBV), 20 paramètres importants communs seront mesurés dans l'ensemble des observatoires.

En France, nous sommes très riches en infrastructures de recherche de la zone critique, mais les observations sont le plus souvent dictées par des questions de recherche trop spécifiques et pas assez génériques. Par exemple, dans le réseau des bassins versants (RBV), il importe d'ajouter une dimension biologique.

Il existe une forte complémentarité entre les zones ateliers (ZA) et les observatoires (SO) dont le dénominateur commun est le long terme. Cette intersection entre ZA et SO doit être regardée en fonction des zones géographiques (Alpes, Garonne, Bretagne, Jura...) et des questions scientifiques abordées avec pour les SO du CNRS-INSU et les ZA du CNRS-INEE, des questions centrées sur les processus, les flux de matière, les modèles des surfaces terrestres, le rôle de la biodiversité, l'adaptation, l'évolution et les interactions Hommes/milieu.

Ceci ne pourrait se faire qu'à la faveur d'une volonté partagée de structure(s) nationale(s) de type Infrastructure de Recherche sur l'Observation des surfaces et interfaces continentales.

■ Outils

La Recherche de demain ne peut se concevoir sans lui associer une analyse fine des outils dont elle a besoin pour être optimale dans ses résultats. Il s'agit donc également de replacer nos propositions en perspective des outils nécessaires, tant en observation qu'en expérimentation, en analyse ou en modélisation, en montrant comment les outils existants sont, soit à la disposition de la communauté, soit restent à inventer ou à mutualiser.

Un certain nombre de constats doivent également nous interroger :

- les sols sont pauvrement représentés dans des modèles globaux, ou même régionaux,
- il existe peu d'indicateurs qualifiant les sols pour les modèles économiques à caractère décisionnel,
- il faut développer des dispositifs de suivi de l'état de santé des sols, de leur bilan genèse/érosion, de leur charge en carbone et de leurs émissions des gaz à effets de serre avec les instrumentations nécessaires, et ce, à différentes échelles.

Enseignement et formation

■ Inventaire

Il existe une dizaine de formations Masters, hors Masters-Pro, qui affichent explicitement « Sols et eau », mais une autre vingtaine de formations en master, qui comportent un fort volet sol – zone critique, sans le terme « Sol ». L'offre totale comprend donc une trentaine de masters, mais elle est spatialement et thématiquement assez dispersée.

Environ 540 thèses ont été soutenues en France depuis 2009 avec « sol » dans le titre et les mots clés. Si on trie un peu plus, on arrive à 320 thèses soutenues depuis 2009, mais avec une dynamique décroissante. Domaines en tête : Géologie (91) et Biologie (70).

■ Évolution du système et propositions

Avec la nouvelle mention des Masters (Bulletin Officiel de février 2014), la place du sol dans les titres risque d'être encore moins présente.

Face à la grande dispersion constatée, et à la nécessité de renouveler les offres de formation sur le sol et la zone critique tout en assurant une transmission satisfaisante des connaissances d'hier et d'aujourd'hui, il serait souhaitable de revenir à un master national entièrement dédié au sol, comme il existait avant la réforme LMD. À défaut, il convient d'organiser un réseau national de compétences et d'échanges d'enseignants et d'étudiants entre Écoles Doctorales.

Au sein du CNRS, il est nécessaire de lancer des écoles thématiques récurrentes sur les sols pour la formation des chercheurs et doctorants.



Journées du Réseau Thématique Pluridisciplinaire « Sols »

7 et 8 octobre 2014

Institut d'Astrophysique de Paris

98 bis Boulevard Arago 75013 Paris

Contexte de la réflexion et objectifs des journées du RTP Sols

C. Valentin (IEES-Paris)

Le CNRS doit clairement mieux se positionner sur les actions de recherche conduites sur les sols, car bien que publiant beaucoup sur le sujet, le CNRS apparaît nationalement peu lisible sur cette thématique de recherche, notamment vis-à-vis d'autres organismes (INRA, IRD...). Il est donc apparu judicieux à l'InEE et à l'INSU du CNRS dans une démarche conjointe, d'engager une réflexion sur les spécificités et savoir-faire du CNRS et plus particulièrement des communautés InEE et INSU dans les recherches conduites autour du sol *sensu lato*. Cette démarche de réflexion a donc débuté suite à la réception d'une première réunion au siège du CNRS à Paris et d'une lettre de mission émise le 15 mai 2013 par G. Bornette et N. Arnaud.

Une analyse bibliométrique de la production scientifique de notre communauté travaillant sur le sol, ainsi qu'un bilan des forces vives de nos UMR impliquées sur cette cible de recherche ont été réalisés.

L'exposé commence par une définition physique et fonctionnelle du sol en insistant sur la nécessité de les concevoir dans son acception la plus large en insistant sur les couplages, à la fois, de processus et d'échelles de temps et d'espace.

Il s'agit pour le CNRS de privilégier les pistes de recherche innovantes sur lesquelles le CNRS pourra faire valoir ses spécificités notamment en termes de transdisciplinarité, afin de lui permettre de se positionner sur cette question dans le paysage national, mais en mettant en avant ses atouts et missions spécifiques.

Cette réflexion a été souhaitée avec la volonté de privilégier les contacts avec les jeunes équipes et les chercheurs qui constitueront le cœur de la communauté en pointe sur ces questions dans la prochaine décennie. C'est donc dans cette logique qu'un certain nombre de jeunes recrutés ont été invités à cette réunion pour nous présenter leur vision des études à conduire sur les sols.

Nous souhaitons également aborder le problème de la forma-

tion actuelle en Sciences du Sol, afin de réfléchir à la façon dont les formations forment, ou pas, les futurs chercheurs de demain à la prise en compte de ces questions scientifiques, et comment la synergie entre formation et recherche pourrait être renforcée dans ces domaines.

La Recherche de demain ne peut se concevoir sans lui associer une analyse fine des outils dont elle a besoin pour être optimale dans ses résultats. Il s'agit donc également de replacer nos propositions en perspective des outils nécessaires, tant en observation qu'en expérimentation, en analyse ou en modélisation, en montrant comment les outils existants, sont soit à la disposition de la communauté, soit restent à inventer ou à mutualiser.

Un certain nombre de constats doivent également nous interroger :

- les sols sont pauvrement représentés dans des modèles globaux, ou même régionaux,
- il existe peu d'indicateurs qualifiant les sols pour les modèles économiques à caractère décisionnel,
- il faut développer des dispositifs de suivi de l'état de santé des sols, de leur bilan genèse/érosion, de leur charge en carbone et de leurs émissions des gaz à effets de serre avec les instrumentations nécessaires, et ce, à différentes échelles.

Les thèmes de recherche d'avenir : le point de vue de jeunes chercheurs

■ Soils as biogeochemical reactors – J. Bouchez (IPGP)

Les processus d'altération et d'érosion sont les processus clés impliqués dans les cycles biogéochimiques, entre autres, en formant et en détruisant les sols. Ces derniers imposent donc un fort contrôle sur les cycles biogéochimiques, en représentant notamment le « hot spot » réactionnel majeur des nutriments. D'où l'absolue nécessité d'étudier le bilan entre production et destruction de sols (Fig. 1)

Les cycles biogéochimiques sont directement impactés par la profondeur des sols, les vitesses de transfert, les temps de résidence, l'âge des matériaux et le caractère stationnaire ou non des échanges. Il est donc essentiel d'étudier les relations âge des sols/temps de résidence et régime d'altération. Dans toutes ces questions, les nouveaux systèmes isotopiques : fractionnements des isotopes stables des éléments métalliques (Li, Mg, Si, Ca, Fe, Sr...) peuvent se révéler des outils de compréhension à privilégier, à la fois pour tracer des processus et calculer des bilans (Fig. 2)

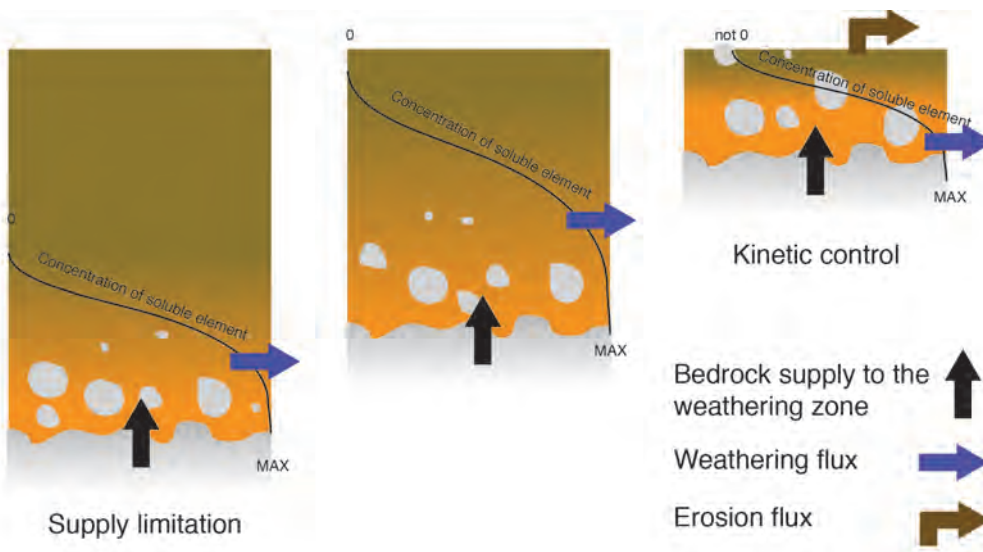


Figure 1. Cinétique de formation des sols par pédogénèse et de destruction par érosion.

H	Li Novel stable isotopes																He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	Lanthanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Fr	Ra	Actinides																			

Figure 2. Isotopes stables des éléments métalliques.

Un exemple d'application de calcul de flux et mise en évidence des principaux processus de fractionnement activés à partir des isotopes du Mg est présenté sur un profil de sol de la Sierra Nevada (Critical Zone Observatory) (Fig. 3).

Les questions soulevées par ce type d'approche sont de plusieurs ordres :

- Comment traiter des compartiments avec des échelles de temps de fonctionnement très différentes (eau, végétaux, matériel solide) ? Et donc quelles doivent être nos attentes en termes d'observation ?
- Quid du dilemme état stationnaire versus état non stationnaire ? Comment trouver les cibles de terrain idéales ? Faut-il

également envisager de considérer les chrono-séquences ?

- Quid de l'intégration spatiale et de la prise en compte de l'hétérogénéité ? Existe-t-il une échelle minimale à considérer ?
- Quelle est la représentativité réelle des processus identifiés et peut-on extraire des lois globales ?

Discussion

F. Arnaud : souligne l'intérêt de travailler sur des chrono-séquences.

J.-P. Ambrosi : quel peut être l'apport de ces méthodes isotopiques sur des sols subissant des changements d'usage ou des apports anthropiques ?

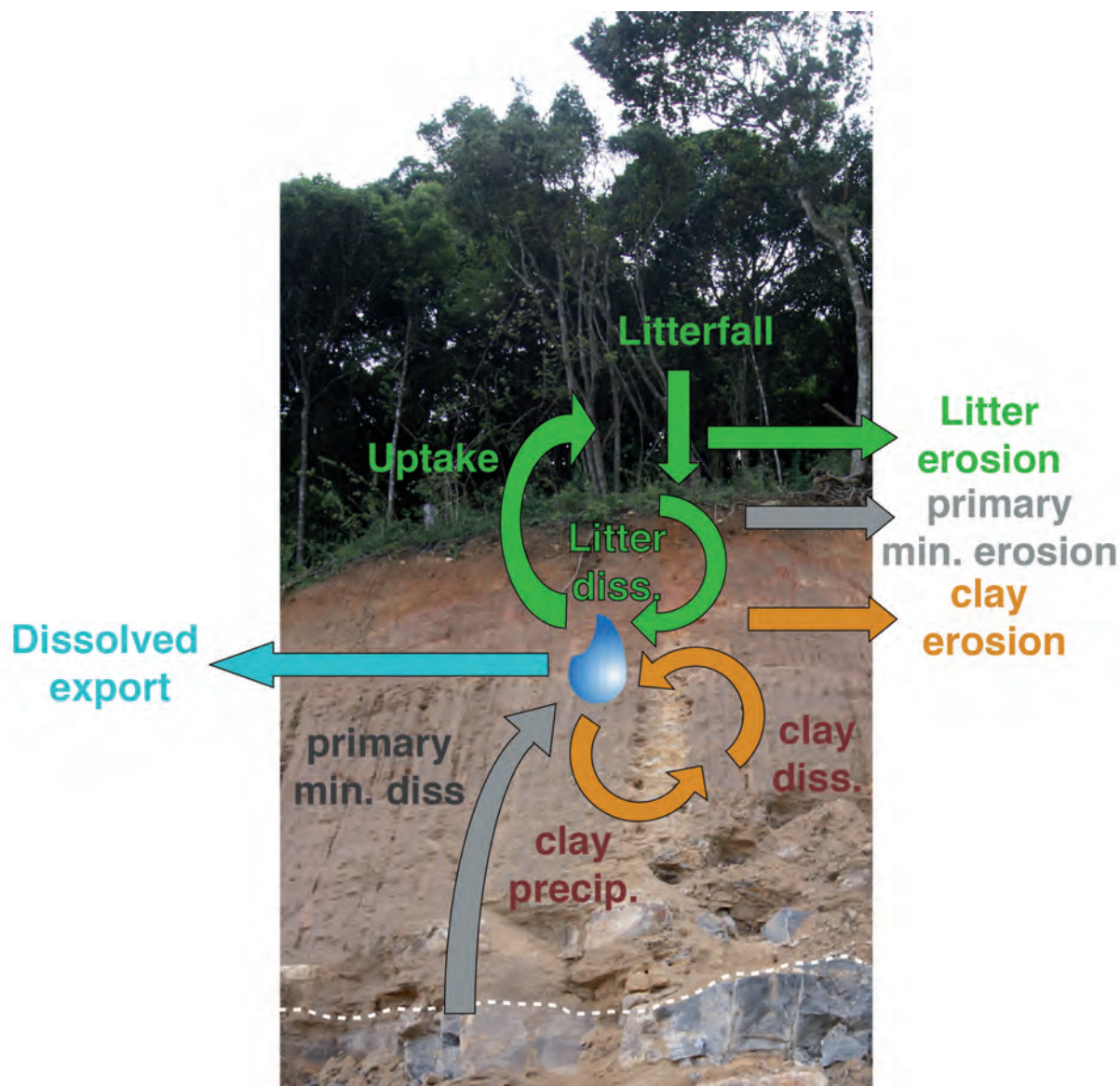


Figure 3. Principaux processus de fractionnement activés à partir des isotopes du Mg et présentés sur un profil de sol de la Sierra Nevada (Critical Zone Observatory).

■ Les thèmes de recherche d'avenir : le point de vue d'un jeune chercheur – P. Barré (ENS Paris)

- Du fait de leur durée et de leur coût, les études sur les sols se restreignent trop souvent à un seul site. Du fait de la grande hétérogénéité des types de sol, les résultats obtenus sur un site précis ne sont pas nécessairement généralisables (Fig. 4). Ce constat a stimulé le développement de techniques rapides et peu coûteuses (spectroscopie IR) permettant des travaux sur un grand nombre de sites mais ne permettant pas une connaissance aussi fine des sites étudiés. Pour dépasser le stade actuel « connaître beaucoup sur rien ou rien sur beaucoup » et aller vers « connaître beaucoup sur beaucoup », il faudrait regrouper les données (ex. de données : minéralogie, caractérisation des matières organiques, diversité biologique etc.) collectées lors de différentes études par exemple en développant la mise en réseaux de sites ou la construction de base de données comme cela se fait pour les travaux en microbiologie.

- Utiliser plus systématiquement le concept de zone critique, en évitant d'étudier le sol isolément.

- Rapprocher les différentes communautés Télédétection et Terrain/Expérimentation.

- Intégrer la pédologie aux études sur les sols (Fig. 4), en déterminant ce qu'il faut connaître du sol pour comprendre son comportement? Ceci pourrait être fait en utilisant la notion de « Soil functional type ».

Discussion

F. Chabaux : retrouver le lien avec le matériel parental ?

J. Gaillardet : oui à la notion de « Soil functional type », mais l'échelle de temps n'est pas la même que pour les « plant functional types » utilisés en Écologie.

J. Bouchez : la notion de perte du savoir pédologique, n'est pas une fatalité, mais il faudrait une politique volontariste.

S. Derenne : il y a une incompatibilité de concilier les processus génériques versus les processus nano/micro échelle.

■ Are Earth system models adapted to study C global dynamics within soils ? – B. Guenet (LSCE)

- Objectif : simuler la dynamique du climat. Dans ces modèles mécanistes, on oublie le cycle du P, malgré son impact sur la végétation. Ce manque provient d'une méconnaissance des processus génériques/globaux pouvant être intégrés aux modèles.

- Le fonctionnement des surfaces continentales est mal contraint à la différence du domaine marin, notamment en raison de la représentation du stock de C des sols.

- Il manque des processus fondamentaux. Comment représenter la chimie des sols ? Aller vers des représentations de la matière organique du sol (MOS) plus proches du réel.

- Il n'y a pas de représentation de la biologie dans ces modèles. Par exemple, la dynamique microbienne n'est pas intégrée de manière réaliste (car *a priori* considérée comme stable, ce qui ne reflète pas forcément l'observation).

- Pas de représentation des profils de carbone versus profondeur.

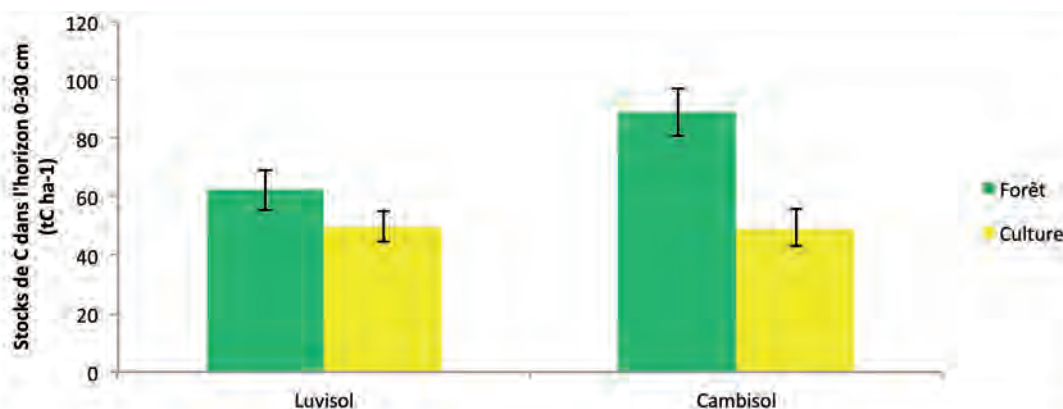


Figure 4. Stocks de carbone de l'horizon (0-30 cm) de Luvisols et Cambisols sous forêt et culture du domaine de Grignon et ses environs. Les barres d'erreur correspondent aux écart-types. Les stocks de C des deux types de sol sont identiques sous culture et significativement différents sous forêt (~50 % supérieur pour les Cambisols). Ne pas considérer le type de sol quand on étudie le lien entre usage des terres et stock de C du sol peut donc conduire à des résultats erronés.

Les thèmes de recherche d'avenir : le point de vue de jeunes chercheurs

- Il est nécessaire de multiplier les couplages modélisation-expérimentation afin de valider/invalidier les fonctions intégrées dans les modèles.

Discussion

C. Valentin : il y a t-il des rétroactions entre T, CO₂, respiration hétérotrophe ?

F. Arnaud : pourquoi ne pas travailler avec des analogues du passé ? Quid des relations avec le réseau RMQS (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols – GIS Sol) ?

■ Rôle des microorganismes dans le fonctionnement du sol et les cycles des nutriments – C. Monard (ECOBIO)

- Liens entre la MOS/Diversité microbienne et les quantités de COV. Rôle des microorganismes dans la dynamique des COV.
- Défi 1 = travailler à différentes échelles de temps et d'espace avec des forçages biotiques et abiotiques.
- Défi 2 = compétences pluridisciplinaires.
- Verrous : identifier le lien diversité et fonction : miser sur de nouvelles techniques d'isolement/cultures des organismes du sol en complément des techniques omiques.
- Double approche terrain/expérimentation.
- Problème du traitement et centralisation des données : base de données « sols » ?
- Compétences en analyse des données bio-informatiques, favoriser les moyens et temps d'échanges.

Discussion

C. Valentin : problème effectif de la constitution de bases de données ; prise en compte des gradients environnementaux, des gradients de pratiques culturales ; quid des relations avec les questions sanitaires (questionnement Sol et Santé) ?

J. Gaillardet : existe t-il des études analogues sur des zones non agricoles ?

J. Poulenc : surpris de voir la nécessité de passer par les cultures de microorganismes.

C. Leyval : on ira de plus en plus vers des observations *in situ* ?

L. Abbadie : pourra-t-on toujours relier la fonction et la diversité ?

S. Derenne : quid de l'outil de traçage entre les produits de dégradation et microorganismes ? SIP-DNA – RNA sur polluants maqués (atrazine par exemple).

■ Diversité fonctionnelle et processus de décomposition des matières organiques – G. Freschet (CEFE)

- Interface Sol/Plante : compromis physiologiques affectant l'allocation des ressources et impact des forçages environnementaux.
- Recyclage des nutriments et dynamique du C des sols à travers la décomposition du matériel végétal (litières).
- Comment les changements de biodiversité affectent-ils les processus aériens et souterrains ? Prise en compte de la plante dans sa globalité et du sol plus en profondeur. Classiquement, la partie aérienne a été beaucoup étudiée alors que la décomposition des racines a suscité peu d'intérêt malgré son importance sur la dynamique de la MO du sol.
- Rôle de la diversité fonctionnelle des plantes sur les fonctions du sol.
- Il faut remettre en question la vision dominante : en dissociant le recyclage des nutriments et la persistance des MOS, puisque celles-ci sont partiellement contrôlées par des pools de matières organiques distincts, des processus biologiques spatialement contrastés et des interactions entre litières (Figs. 5 et 6).
- Dissociation spatiale des fonctions.
- Les litières sont des mélanges non homogènes, donc effets différents sur la persistance des MO ou le recyclage des nutriments. Interactions entre litières et macrofaune du sol. Interactions entre éléments organiques et minéraux du sol.

Discussion

J.-P. Ambrosi : ces données sont-elles utilisables dans des modèles considérant la MOS comme homogène ?

P. Barré : il existe un enjeu sur les synthèses faites par les microorganismes. Il faudrait adjoindre de l'écologie microbienne aux travaux menés. Regarder les types fonctionnels de sols et le type de décomposeurs, eux-mêmes influencés par le type de matière organique rentrant dans le sol.

J. Gaillardet : quelle est la question fondamentale posée ? On ne peut pas maximiser l'accumulation de la MOS et sa dégradation.

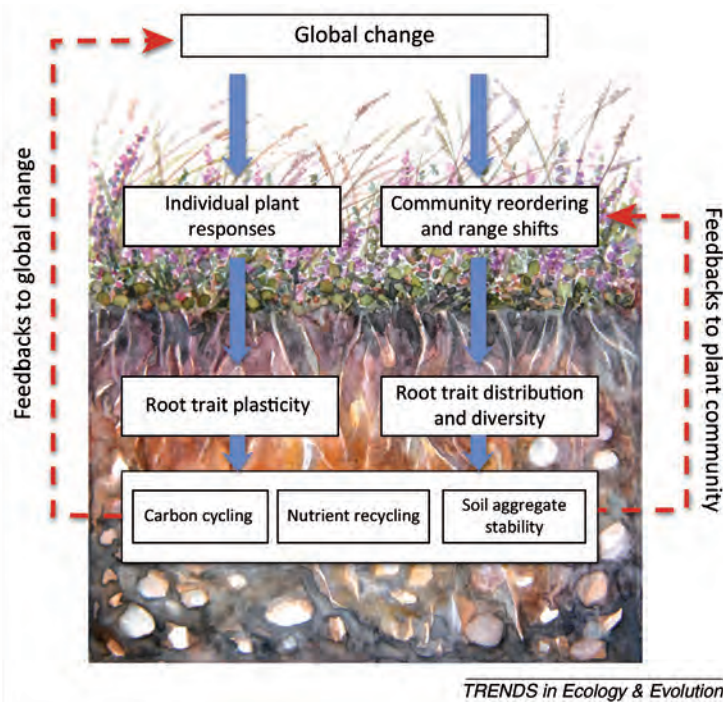


Figure 5. Root trait responses and feedbacks triggered by global change. Global change phenomena, such as climate and land use change, impact root traits and ecosystem processes via individual plant responses (root trait plasticity) and community level responses (root trait distribution). In turn, these belowground responses feedback to the plant community, for example via altered nutrient and water availability in soil, and to the Earth system, via changes in soil CO₂ flux. Image by Jill Colquhoun Bardgett in: Bardgett, R. D., Mommer, L., De Vries, F. T., 2014. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *TRENDS IN ECOLOGY & EVOLUTION*, 29(12): 692-699.

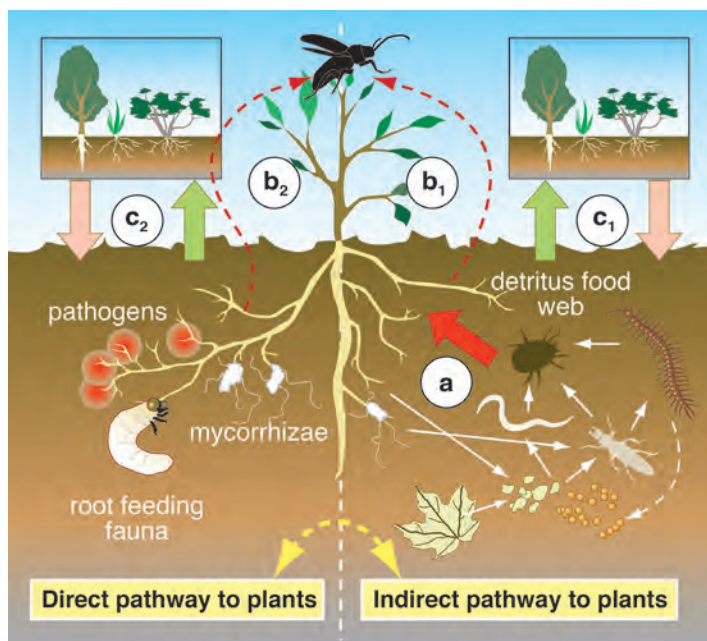


Figure 6. Aboveground communities are affected by both direct and indirect consequences of soil food web organisms. (Right) Feeding activities in the detritus food web (slender white arrows) stimulate nutrient turnover (thick red arrow), plant nutrient acquisition (a), and plant performance and thereby indirectly influence aboveground herbivores (red broken arrow) (b1). (Left) Soil biota exert direct effects on plants by feeding on roots and forming antagonistic or mutualistic relationships with their host plants. Such direct interactions with plants influence not just the performance of the host plants themselves, but also that of the herbivores (b2) and potentially their predators. Further, the soil food web can control the successional development of plant communities both directly (c2) and indirectly (c1), and these plant community changes can in turn influence soil biota. Wardle, D.A., Bardgett, R.D., Klironomos, J.N., Setälä, H., van der Putten, W.H., Wall, D. H., 2004. Ecological Linkages Between Aboveground and Belowground Biota. *SCIENCE*, 304:1629+1633

C. Leyval : quelle est l'importance de la macrofaune ?

de la décomposition du C à plus grande échelle ?

J. Poulencard : il faut considérer l'importance du passage du trait fonctionnel au type de sol ? Le trait fonctionnel peut faire le lien entre la plante et le sol si une question précise est posée.

G. Freschet 8 modèles versus processus ; tel est le Défi ! Mais on obère certains processus pour refléter la dynamique du climat.

J.-P. Ambrosi : il existe des travaux sur les liens racines/éléments minéraux.

F. Chabaux : le va et vient temporel est nécessaire. Problème d'échelles temporelles différentes entre la dynamique des communautés végétales et la dynamique du C dans les sols.

J. Bouchez : il faudrait peut-être regarder une paramétrisation

Les thèmes de recherche d'avenir :

le point de vue d'autres chercheurs

■ Étude des mécanismes et des dynamiques de transferts d'eau, nutriments et métaux dans la zone critique – P. Oliva (GET)

L'exposé commence par un bref rappel sur les forces réellement en présence sur ces questions de recherche axées sur les sols au GET (5 chercheurs qui disent travailler sur les sols + 25 chercheurs qui travaillent sur la zone critique).

Il persiste en effet de nombreuses imprécisions dans la connaissance du fonctionnement des sols et de la zone critique dans son ensemble... et donc dans les flux estimés entre les compartiments.

La pluridisciplinarité : un atout dans la compréhension du fonctionnement des sols et de la zone critique : exemple du projet SUBMERSOIL (EC2CO Janv. 2013-Déc. 2014).

- Cycles hydrologiques et biogéochimique (redox) dans les sols de la zone de marnage du réservoir Nam Theum II (sud Laos).
- Simulation de pluies en fonction de la pente où il est montré que l'infiltration est supérieure sur les parcelles à forte pente, ce qui illustre la moindre énergie cinétique des pluies reçues et le plus faible niveau d'encroûtement superficiel.
- Couplage « observations et suivis de terrain » ; effets des cendres de feux de forêt sur la chimie du ruisseau : apport des SOERE.
- Il faut considérer la continuité latérale et verticale du sol et la continuité verticale et latérale des processus dans la zone critique, en particulier au niveau des interfaces et au cours du temps dans des contextes de modifications du milieu.
- Comment appréhender l'hétérogénéité des composantes de la Zone Critique et du « sol » en particulier ?
- Quelles sont les limites de la zone active en Termes de processus et de Flux ?

- Comment hiérarchiser l'importance des processus observés dans le temps et dans l'espace (hot moments/hot spots) ?
- Repenser la minéralogie des sols (phases amorphes, phases complexes...)*
- Mieux intégrer le rôle de la faune du sol.
- Mieux intégrer les échanges gazeux.
- Développer l'hydro-pédologie.
- La solution du sol (limitations méthodologiques).
- Adapter et compléter les méthodologies à ces nouveaux enjeux (capteurs *in situ*, expérimentations couplées en laboratoire, expérimentations en mésocosmes, renforcer le lien avec l'INRA, la modélisation, les traceurs isotopiques).

Discussion

- S. Derenne : quelles sont les limites des outils de prélèvement des solutions de sol ?
- F. Mermillod-Blondin : comment prendre en compte le rôle de la faune du sol ?

■ Biogéochimie, transferts et écotoxicologie des écosystèmes terrestres – J. Martins (LTHE)

LTHE (± 25 chercheurs) travaillant sur les sols. Dans l'équipe TransPore : mieux comprendre le sol en tant qu'interface centrale dans le cycle de l'eau -> Transferts réactifs d'eau et de matière dans les milieux poreux (sols, sédiments, déchets...).

Approches couplées expérience/théorie centrées sur les aspects abiotiques et biogéochimiques des transferts De type analyse des systèmes pour hiérarchiser les processus à différentes échelles et identifier les coefficients. Approche de simplification de la complexité.

Transferts et réactions biophysicochimiques dans le *continuum*

air-sol-nappe. Rôle de la structure spatiale des sols dans leur fonctionnement biohydrogéochimique (microtomographie R-X), évolution de biofilm bactériens dans les milieux poreux (nanotomographie R-X sur la ligne I19 de l'ESRF).

Rôle des apports organiques sur la structuration spatiale des sols (ex : agrégation), sur les communautés microbiennes et donc la sensibilité aux contaminants.

Mieux comprendre les interactions et modéliser les interactions polluants/sols/microorganismes. Rôle du transfert accéléré des polluants par les colloïdes (bactéries, argiles...) dans les sols. Utilisation de biocapteurs bactériens pour évaluer la biodisponibilité du Cu dans les sols.

Privilégier les approches intradisciplinaires, renforcer le développement d'outils intégrateurs, développer des approches intégrées terrain versus batch, polluants émergents, freiner le désintérêt du public pour le sol/formation.

Effort de structuration de la communauté sur Grenoble : atelier transversal sur les sols dans le cadre de l'OSUG.

Quelques questions centrales :

- Le sol, régulateur des fonctions des écosystèmes ?
- Le sol, régulateur de la santé publique et du bien-être ?
- Le sol, médiateur du recyclage des nutriments, des processus de transport et des interactions sol-plantes-microorganismes ?
- Le sol, quelles dynamiques de dégradation et quelles approches de remédiation ?
- Quelle gestion des sols, pour une meilleure protection ?
- *Quid* de la formation ?

Discussion

C. Valentin : prise en compte du gonflement, retrait ?

C. Leyval : comment relier la biodisponibilité à l'impact ? Il faudrait pouvoir utiliser des biocapteurs.

J. Gaillardet : que penses-tu des observatoires des sols ? Ils sont trop cloisonnés...

C. Valentin : importance des technosols.

J.-P. Ambrosi : projets en cours sur les sols urbains.

■ Constantes de temps des processus d'altération et quelques enjeux en sciences du sol ? – F. Chabaux (LHyGeS)

Formation des profils d'altération : évolution des surfaces continentales, prédiction de leur évolution en réponse aux modifications environnementales (forçages tectonique, climatique, anthropogénique), fertilité des sols - qualité des eaux... Mais, les réactions d'altération sont plus ou moins bien connues.

Quels sont les lieux et jeu des réactions d'altération dans le milieu naturel ? Quelle est l'extension verticale des réactions d'altération (géométrie des structures d'altération, propagation dans l'espace et dans le temps) ? Comment prendre en compte l'héritage et le poly-phasage des processus de formation des sols ? Ces interrogations ont un impact sur les méthodes/approches à développer pour définir des constantes de temps des processus de formation des sols.

Quels sont les mécanismes contrôlant la propagation des fronts d'altération ? Faut-il développer des approches d'investigations spécifiques ? Faut-il mobiliser des compétences en « résistance des matériaux... » ?

Les formations d'altération : des formations à l'histoire - (héritage) modifiées par des processus agissant avec des constantes de temps différentes. Comment l'histoire ancienne peut elle contrôler l'altération actuelle ?

Il faut définir les phases actives dans les formations anciennes, trouver des phases ou des systèmes spécifiques d'étapes d'altération et pour cela combiner des outils et approches enregistrant les processus d'altération sur des échelles de temps différentes.

Fortes compétences disciplinaires avec un haut degré de technicité sur les outils chronométriques (^{14}C , cosmonucléides, K/Ar, Ar/Ar, paléomagnétisme, OSL, série de l'U). Définition du cadre de ces outils. Valeur des âges, taux d'altération ? Besoin de comparer les taux d'altération quantifiés à travers plusieurs outils.

Discussion

2015-2030 rapprocher les compétences et les disciplines, structuration de notre communauté nationale « sol »/« zone critique »/« zone atelier » et renforcer sa place au niveau international.

2015- 2016 : proposition d'une école d'été/workshop sur la thématique « constante de temps des processus d'altération ».

Les thèmes de recherche d'avenir : le point de vue d'autres chercheurs

C. Valentin : à quoi correspondent les chiffres d'altération fournis ?

J. Poulenc : nous avons un handicap sur la méconnaissance des vitesses de processus.

Y. Godderis : il faut avoir une vision intégrant la modélisation dès le début.

F. Arnaud : peut être, regarder certains sites clés à plusieurs, pour structurer la communauté.

■ La matière organique dans les sols – S. Derenne (METIS)

Pourquoi une caractérisation au niveau moléculaire ?

= Effet crucial sur les propriétés du sol (CEC, disponibilité de nutriments, stabilité structurale, capacité de rétention d'eau) + teneur étroitement associée à la fertilité des sols + rôle clé dans le transport de xénobiotiques + influence sur la qualité de l'eau + l'un des principaux compartiments terrestres de C (1500 Gt C) et rôle majeur dans le cycle global de C + sensible aux changements (usage des sols, climatiques) + prise en compte dans les modèles comme « boîte noire » avec 3 à 5 compartiments cinétiques. Elle est de plus hétérogène, étant formée d'un mélange complexe de constituants d'origine microbienne, animale et végétale, avec une grande diversité de fonctions chimiques, de taille de molécules.

Pour prédire sa dynamique, sa réactivité et parce qu'elle est trop peu intégrée dans les modèles. Il s'agit aussi de comprendre sa réactivité, notamment dans le transport de xénobiotiques, de déterminer les mécanismes de sa stabilisation, et de fournir des recommandations sur les pratiques culturales pour augmenter la fertilité des sols.

Utilisation des lipides, très bons marqueurs de dégradation.

Lipides de haut poids moléculaire = marqueurs de communauté microbiennes et d'environnement (T, pH...), mais seuls les lipides libres et de bas poids moléculaires sont étudiés la plupart du temps.

La caractérisation du N organique, se révèle difficile et donc il y a nécessité de développer des méthodes spectroscopiques performantes.

Caractérisation des associations organo-minérales par couplages avec des méthodes d'imagerie chimique (NanoSIMS) et spectroscopiques (STEM), mais le problème du changement d'échelle perdure.

• Verrous : représentativité des analyses et caractérisation de

certaines compartiments de la matière organique (hydrophile, azotée).

• Perspectives : combiner les approches analytiques ainsi que le développement de nouvelles méthodes et approches, étudier le maximum de compartiments possibles de la MO (\neq poids moléculaires de lipides, fractions séparées physiquement), confronter les résultats obtenus à différentes échelles et encourager l'émergence des mesures *in situ* pour qu'elles fournissent des informations moléculaires.

Discussion

G. Freschet : cette approche analytique reste toutefois très qualitative dans la caractérisation moléculaire.

C. Valentin : quid de l'origine de la matière organique du Rio Negro ?

J.-P. Ambrosi : ces outils ont ils été spécifiquement développés pour l'analyse des sols ? Non, pour la géochimie pétrolière

■ Y. Moënné-Loccoz (LEM)

Il est important de travailler avec du sol quand on s'intéresse aux micro-organismes, mais on manque d'outils d'analyse *in situ*, notamment à micro-échelle.

Difficulté de prise en compte de l'hétérogénéité du sol ; limite des outils d'échantillonnage des micro-organismes (diversité). Analyse de la présence et de l'expression génique de bactéries *in situ*. La majorité des études s'intéressant aux interactions fines entre microorganismes et racines se font hors sol.

« Les plantes ont des racines et les racines sont dans le sol ». « Le sol est cloisonné et les chercheurs aussi ».

La compréhension du fonctionnement biologique du sol doit prendre en compte les microorganismes, la faune et les plantes.

Il n'existe que peu d'approches intégrées et un peu par accident, principalement en phytopathologie (maladie des racines, lien avec la disponibilité du fer, élément important dans les processus de phytoprotection).

« La plupart des sols sont plutôt dans les champs » : d'où un nécessaire aller-retour Laboratoire/Terrain.

Il faut prendre en compte le facteur temps, mais comment étudier l'évolution du fonctionnement biologique du sol sur différents pas de temps, car il n'existe rien sur les temps intermédiaires ! Pas de temps court (couplages des processus racinaires et/ou microbiens, notion de pédogenèse instantanée ?) versus pas de temps longs (domestication des espèces végétales, diversification/évo-

lution des espèces végétales domestiquées ou sauvages).

Garder à l'esprit l'impact du changement global sur le fonctionnement du système et sur les services écosystémiques.

Discussion

F. Chabaux : comment caractériser des fonctionnements biologiques anciens ?

C. Leyval : quelle est l'échelle d'étude la plus adaptée ? Réponse : nous sommes malheureusement dans l'incapacité de faire un transfert d'échelle.

F. Arnaud : pourquoi ne pas essayer sur des enregistrements plus anciens ? Réponse : cela s'avère difficile...

C. Valentin : avez-vous des liens avec les médecins ? Réponse : Oui, mais finalement plus via les pathogènes liés à la rhizosphère que directement au sol.

■ Le sol vu par L. Abbadie et ce, sans support visuel – L. Abbadie (IEES-Paris)

En tant qu'écologue, il s'intéresse à de courtes échelles de temps <1000 ans.

Le sol est un objet majeur d'intérêt au regard de ses interactions avec le climat. Les rétroactions du vivant sur le sol et donc le climat ne sont pas prises en compte. Il y a donc une véritable urgence à avancer sur les questions scientifiques traitant du sol.

On a du mal à avancer sur des généralités pour améliorer nos prédictions et agir sur les sols.

Il faudrait effectivement utiliser le concept de « Soil Functional Type » avec 8 ou 10 types pour cadrer l'action, favoriser l'approche expérimentale, y compris sur des sols artificiels, car nous manquons d'objets modèles sur lesquels, on démontrerait les processus afin de trouver des règles générales. Le sol est impossible à étudier. Il faut simplifier pour tirer des règles générales. Nous n'avons pas d'objet modèle, comme la drosophile. Nous avons besoin de théorie.

Définition du sol = vivant portant la dynamique de l'évolution. Le sol est le siège de l'accommodation du vivant via des stratégies incroyables. Ce vivant est par rétroaction, un acteur fondamental de la dynamique du sol. On ne peut donc le caractériser qu'en décrivant son vivant. Un sol n'existe pas si la végétation qu'il supporte n'est pas précisée.

Il y a peu de connexion avec le reste de l'Écologie quand on

travaille sur le sol, même si cela peut aider à répondre à des questions fondamentales de Biologie.

Grandes questions concernant les sols :

- Mécanismes conduisant à l'accumulation/déstockage de C dans les sols.

- Relations structure moléculaire de la matière organique du sol et dynamique du vivant (micro-organismes).

- Relations monde épigé/hypogé (ex : effet des litières sur la plante et sa pollinisation par les insectes).

- Dimension spatiale du sol (architecture souterraine avec laquelle le vivant va composer).

- Couplages des cycles avec les processus biologiques (stœchiométrie écologique).

Discussion

G. Freschet : reprend l'idée de travailler sur des sols modèles, voire des écosystèmes modèles pour aller encore plus loin. Les écotrons peuvent apporter une réponse.

Oui, mais les biologistes sont très centrés sur les interactions vivant/vivant, et donc peu de place est alors laissée à l'inorganique.

J. Gaillardet : les deux communautés peuvent se retrouver sur des successions évolutives. Sensibilité des trajectoires aux conditions initiales. Il faut aller sur des sites extrêmes pour apprendre plus vite à travailler ensemble.

F. Chabaux le sol « inorganique » n'a pas du tout été évoqué. En Sciences de la Terre, les chercheurs prennent de plus en plus en compte la Biologie, mais la réciproque ne semble pas évidente. Réponse : Oui, mais les biologistes sont très centrés sur les interactions vivant/vivant, et donc peu de place est alors laissée à l'inorganique.

C. Valentin : le sol n'est pas qu'un « cadre » au monde vivant. Il est directement en interaction avec lui. Au demeurant, il n'y a pas non plus dans cette présentation de référence à l'intervention humaine. Or, nous ne pouvons nous en affranchir.

■ Thèmes de recherche d'avenir « sols » - C. Leyval (LIEC)

Les sols très anthropisés sont soumis à de fortes pressions, d'où une diminution de la surface des sols cultivables. Les écosystèmes terrestres sont fortement affectés par les activités humaines et les changements globaux. D'où des sols délaissés (contaminés, friches) que nous pourrions être obligés de réutiliser (Fig. 7).

Les thèmes de recherche d'avenir : le point de vue d'autres chercheurs



Figure 7. Enjeux : devenir des sites et sols pollués ?

Se posent alors les questions de restauration des propriétés et re-fonctionnalisation des sols, et non plus uniquement de remédiation de la pollution. D'où la nécessité d'entreprendre des études pluridisciplinaires sur le long terme.

- Verrous : la méso-échelle (du bloc de sol au bassin versant) moins connue que la micro-échelle ou
- les grandes échelles (>1000 km). La méso-échelle se caractérise par une hétérogénéité spatiale et temporelle, les interactions entre organismes (ex. microflore-faune-polluants-plantes).
- Peut contribuer aux études des processus de transferts et de modélisation des petites échelles (micro et nano) aux plus grandes échelles (<1000 km).
- Écodynamique des contaminants dans le sol et la rhizosphère = dynamique de la communauté microbienne totale et fonctionnelle + influence de la concentration, de la disponibilité, de la toxicité, multi-pollution + influence du milieu (type de sols, facteurs physico-chimiques, sources de nutriments, hétérogénéité spatiale) + influence des plantes (espèce végétale, nature des exsudats, surfactants...).
- Passage nécessaire par des dispositifs simplifiés et en couplant avec les techniques de microbiologie environnementale

(ex : SIP avec marquage de polluants) et des techniques spectroscopiques.

- Verrous sur ces sols contaminés : a) les situations de terrain (pollutions historiques, faible disponibilité), les contaminations multiples, multi-stress (nutritionnel, changement climatique, salinité, dégradation physique). b) Mieux définir le terme « Qualité des sols » pour quel « service » : diversité et fonction biologiques des sols ? Notion de « Sol » de référence ? Création de nouveaux sols/écosystèmes ? Indicateurs, capteurs environnementaux, bio-senseurs *in situ* à développer. c) L'identification des processus biotiques et abiotiques dans le devenir des contaminants dans les sols.
- Outils : nécessité de garder un intérêt pour les différentes approches complémentaires (lysimètres, écotrons...). Mettre en réseau ces différents dispositifs (ZA, BV, lysimètres...) qu'ils soient labellisés ou non ? Nécessité de la gestion des données (archivage, pérennisation) et des échantillons.

Discussion

F. Chabaux : comment faire passer les messages sur la conservation d'échantillons précieux ?

J. Martins : si l'on revient sur le point des sols de référence ; ce serait sans doute illusoire.

Les domaines d'excellence actuels du CNRS : débat introduit et animé par F. Arnaud (EDYTEM)

L'introduction au débat animé par F. Arnaud commence par une analyse bibliométrique réalisée *via* le Web of Science avec les mots-clés « France » dans adresse et « Soil » dans topic. De cette analyse entreprise pour faire émerger des éléments de réponse à deux questions : Quels sont les sujets « chauds » ? Qui sont les leaders au niveau national ? Il ressort un certain nombre de points parmi lesquels :

Le CNRS publie plus que l'INRA dans le domaine des sols, mais les domaines de recherche en tête ne sont pas les mêmes. L'INRA publie majoritairement sur l'Agriculture, alors qu'au CNRS le thème qui ressort est : « Environmental Sciences Ecology ».

L'approche « Géosciences » est un plus du CNRS par rapport à l'INRA. La Géologie s'empare du sol au CNRS entre 2008 et 2013 avec une part agriculture qui diminue au CNRS entre 2008 et 2013.

Les 5 papiers les plus cités sur cette période traitent du cycle du C, d'écologie, de génétique et de services écosystémiques/fonctionnement des écosystèmes.

Environmental Sciences - Ecology = fonctionnement des écosystèmes, base de données, télédétection-modèles, grands cycles (C, N)

Geology = grands cycles (C, H₂O, CH₄, N, Fe), géomorphologie, climat

Agriculture = grands cycles (C, matière organique, N), déchets

Engineering = aléas-climat, nano, métaux, hydrologie, géotechnique, grands cycles (Hg)

Geochemistry-Geophysics = sols martiens, grands cycles (C, matière organique), microchimie

Il ressort de cette analyse que le nombre de citations reste « raisonnable » pour tous et que pour les leaders, ces articles sur le sol ne correspondent qu'à une petite partie de leurs publications. On en revient au même constat : « tout le monde « fait » du sol, mais peu d'entre nous le définissent comme leur sujet de recherche ». Les chercheurs du CNRS mettent

en avant les mécanismes étudiés plutôt que les objets d'étude (milieux étudiés).

Le sol vu par le CNRS = courroie de transmission des grands cycles (C, nutriments, H₂O, contaminants), lien entre biodiversité et fonctionnement de l'écosystème, enjeu en termes de traitement de déchets, courroie de transmission entre changement climatique et aléas (crues), matrice de support d'innovation (Génétique, Microbiologie, Microchimie, Géophysique...) dans la manière de l'aborder.

Cette étude a cependant des limites puisque l'objectif est resté non normatif, tous les domaines n'ont pas le même poids et de grands champs échappent à cette analyse.

Il faudrait sans doute faire traiter la question par l'INIST pour être plus exact d'un point de vue quantitatif, mais qualitativement l'étude est significative.

Discussion

J.-P. Ambrosi : suggère de rentrer par les journaux.

S. Derenne : suggère d'afficher, à la fois, titre + *abstract* + mots clés. Les points forts du CNRS se trouvent dans un fort potentiel sur les Géosciences, la prise en compte des temps longs, les grands cycles et les modèles.

G. Freschet : il est plutôt rassurant de voir que le CNRS, et pas seulement l'INRA, s'intéresse à l'agriculture.

P. Oliva : les chercheurs n'affichent sans doute pas assez « l'objet » Sol dans leurs thématiques de recherche, même si pour beaucoup il est au cœur de leurs travaux.

B. Guenet : et ce, malgré somme toute, beaucoup de succès sur les projets sols en termes de financement.

S. Derenne : il apparaît que la matière organique des sols est maintenant perçue comme plus moderne dans les congrès internationaux.

C. Leyval : il est toutefois surprenant de ne pas voir apparaître « Écotoxicologie » comme bien représenté dans l'analyse bibliométrique réalisée.

Le partenariat à travers les UMR : débat introduit et animé

par C. Valentin (IEES-Paris)

L'exposé de C. Valentin débute par une analyse des forces en présence, qui devra être corrigée par les principaux intéressés, les plus à même de corriger le bilan préliminaire présenté.

Les effectifs par nouvelle région sont présentés.

Les universités sont le premier partenaire des UMR travaillant sur les sols. Les autres partenaires sont : IRD (8), 4 INRA (4), INRAP (2), CNES (2), BRGM (1), IFFSTAR (1), CIRAD (1).

Ce partenariat permet au CNRS de se positionner sur cette question dans le paysage national, mais en mettant en avant ses atouts et missions spécifiques.

Cette analyse montre malgré un domaine de recherche peu visible au CNRS, des effectifs relativement importants, avec à la fois une assez forte dispersion mais des possibilités de synergies régionales et nationales. Elle pose la question des relations avec l'INRA, l'IRSTEA et les Travaux Publics, au demeurant pour ce dernier relativement absents du bilan.

Discussion

P. Barré : la communauté sol de l'INRA est beaucoup mieux structurée que la communauté CNRS.

G. Bornette : il faudrait réaliser une liste de diffusion sur ces questions.

C. Valentin : il y a peu d'unités INRA partenaires car l'INRA souhaite garder son autonomie scientifique.

F. Arnaud : il faut favoriser les associations sous d'autres formes avec l'INRA (Fédération de Recherche, OSU...) puisque ce type de collaborations ne se concrétise pas par des UMR.

Éléments de prospective :

débat introduit et animé par C. Valentin

(IEES-Paris)

C. Valentin présente quelques documents pour lancer le débat :

■ Faut-il intégrer le type de sol dans les études et si oui comment ? Via le ou les « Soil Functional Type(s) » ?

Y. Goddérés : il y a la nécessité d'un aller-retour terrain/labo/modélisation (pas seulement à la fin).

F. Arnaud : on ne peut se satisfaire de la question du sol artificiel.

P. Barré : concernant la notion de *Soil Functional Type*, il serait intéressant de faire des regroupements.

C. Valentin : la question est : fonctionnel de quoi ? Par rapport au cycle du C, à l'érosion ?

J. Poulenard : cela paraît effectivement difficile. Il faut faire passer un message à destination des autres communautés.

G. Freschet : milite, lui, pour les caractéristiques fonctionnelles de chaque sol plutôt.

Y. Goddérés : pense que cette notion de *Soil Functional Type* correspond à un biais très modélisateur (quand on ne comprend pas les mécanismes on fait des boîtes).

P. Oliva : on pourrait faire le lien entre une nomenclature difficile et les processus dominants. Il serait cependant dangereux de simplifier à outrance.

B. Guenet : n'est pas d'accord. Pour les modèles à grande échelle, il manque de la clarté pour aider les modélisateurs à faire des liens.

P. Oliva : il faudrait peut-être essayer de récupérer des milliers d'analyses de sols faites par le privé.

D. Faure : demande à repréciser le terme de fonctionnement car il dépend de la question posée.

J. Martins : on ne pourra pas simplifier à l'extrême ces « Soil Functional Types ».

J.-P. Ambrosi : sans aller sur un sol modèle, on pourrait essayer de faire un effort de classification partagée par les écologues, pédologues...

C. Leyval : il faut garder et optimiser la pluridisciplinarité pour une vision moderne du sol.

Y. Goddérés : il faut garder la diversité des sols dans la modélisation.

P. Barré : comment quantifier ce qui reste très qualitatif souvent en pédologie ?

G. Freschet : attention, ne reproduisons pas des erreurs produites.

C. Valentin : les pédologues actuels font tous du fonctionnement, avec référence à des traits quantifiés.

J. Gaillardet : mais, on ne comprend pas les trajectoires du sol, les variables d'état du système « Sol ».

J. Poulenard : pour répondre aux questions clés, on se doit de se positionner dans des trajectoires temporelles (d'où le développement de paléo-modèles).

Y. Moenne-Loccoz : le concept de « Soil Functional Type » n'est pas nouveau. En revanche l'utilisation de ce concept pourrait être intéressante dit P. Barré.

■ Via un sol artificiel, unique cible de nos efforts ?

C. Leyval : on ne peut travailler sur un même sol ; problème d'approvisionnement. Sol artificiel ; pas convaincue.

G. Bornette : difficile d'avoir un *a priori*. On a besoin des deux, mais le sol modèle n'est pas la panacée, il faut pouvoir travailler sur des gradients. Travailler sur des gradients permet de tester l'influence de variables de forçage naturelles ou anthropiques.

Éléments de prospective ; débat introduit et animé par C. Valentin (IEES-Paris)

F. Arnaud : tous les dispositifs existent et l'important est de le savoir et de le faire savoir.

D. Faure : il faudrait plutôt partager des sites d'observation plutôt que des sols modèles.

P. Barré : il faut relier cette idée de sol modèle à une base de données.

D. Faure : idée intéressante dans du comparatif.

Y. Goddérés : cette idée n'existe pas chez les géochimistes travaillant sur l'altération.

J. Gaillardet : bien sûr, il faut 1 million d'année pour faire un sol.

Y. Moenne-Loccoz : plus facile quand on fait de l'expérimentation avec des végétaux.

J. Martins : cela n'a aucun sens d'envisager un sol modèle, qui reste par essence forcément lié aux questions adressées.

F. Arnaud : un sol modèle ou un sol artificiel peut être l'arbre qui cache la forêt. Cela ne répond pas aux questions de méta-échelles qui ne peuvent être réglées par le recours à des mésocosmes. Nous avons besoin de renseigner vraiment les sols étudiés, puis d'analyser les métadonnées disponibles.

■ Via la modélisation ?

Y. Goddérés : il faut des modèles adaptés aux questions posées. Les modèles savent s'adapter. Pour le futur, il faut revenir à des approches plus mécanistes.

J. Martins : le transfert d'échelle spatiale est une question de recherche en soi impliquant une hiérarchisation des processus.

■ Sol/Atmosphère

B. Guenet : comme aux États-Unis et en Allemagne, il existe en France à la fois une forte communauté climat et une forte communauté sol. C'est un atout ! Le tout avec un fort appétit de mieux comprendre le sol pour alimenter les modèles. Le CNRS peut parfaitement jouer un rôle fort.

Y. Goddérés : il est également à noter l'existence d'une petite communauté CNRS sur la modélisation des climats du passé.

C. Monard : il existe aussi de l'expérimentation.

P. Oliva : il faut aussi prendre en compte les composés organiques volatiles dans les modèles.

J. Gaillardet : le sol est une ressource à préserver car mise en

danger. Le sol est central dans la question de la ressource en eau (quantité et qualité).

G. Bornette : il faut inclure les problèmes d'écotoxicologie.

S. Derenne : ainsi que les quantités et qualité des matières organiques présentes dans les eaux, de même que les produits de dégradation.

J. Poulencard : dans les formations sol et eau sont associés.

J. Gaillardet : il faut attirer des chimistes sur les capteurs notamment. Il n'existe pas réellement de monitoring des sols, hormis la température et la teneur en eau.

C. Leyval : il faut inclure le trio Eau/Sol/Nappe si l'on veut vraiment comprendre les dynamiques de contaminants.

P. Oliva : la communauté des zones humides et des tourbières est relativement bien représentée au CNRS.

G. Bornette : en Écologie fonctionnelle, l'eau au CNRS est dans le top 5.

C. Leyval : il faut arriver à faire reconnaître au-delà de la qualité de l'eau, le problème de la qualité des sols.

■ Sol/Eau

J. Gaillardet : grande question. On prélève 40 % du cycle hydrologique globalement. Le sol est central dans les questions de la qualité et de la quantité. Il faut attirer la communauté des chimistes, notamment pour développer de nouveaux capteurs.

S. Derenne : plutôt des physicochimistes, formation des colloïdes, les transports... Se pose la question de la nature de la MO dans les eaux.

J. Poulencard : les masters sols sont presque toujours associés à l'eau.

G. Bornette : notamment pour des questions d'épuration, écotox. Le domaine de l'eau constitue une grande force du CNRS au niveau mondial, top 5 des publiants mondiaux.

C. Leyval : la pollution sols est associée à celle des eaux jusqu'à la nappe, mais il n'y a toujours pas de directive européenne sur les sols, analogue à celle sur l'eau.

P. Oliva : des rapprochements sont à établir avec les communautés des zones humides et des tourbières (enregistrements, cycle du carbone, intégration avec les milieux connexes).

L. Abbadie : l'ONEMA vise à rétablir le bon état écologique des

eaux à l'aide de nouvelles générations d'indicateurs plus intéressants qu'additifs.

■ Sols vivants

C. Leyval : il faut appréhender la question clé du lien diversité/fonction.

G. Freschet : la question n'est pas la biodiversité, mais la diversité de fonctions !

L. Abbadie : il faut aborder la question de la relation dynamique épigée/hypogée ; en adoptant une vision plus intégrée en allant jusqu'aux racines profondes.

P. Oliva : le CNRS ne diffuse pas assez auprès des acteurs de terrain au regard de ce que fait l'INRA.

P. Barré : il faut aller au-delà en termes d'espace ; aller vers le domaine de la parcelle ou du paysage.

D. Faure et Y. Moenne-Loccoz : il faut essayer de plus raccrocher le vivant dans le sol ; mettre l'accent sur l'Écologie au lieu de la Biologie des sols.

J. Poulenc : il faudrait essayer de rapprocher les spécialistes des flux et les spécialistes de stœchiométrie écologique.

J. Gaillardet : Oui, la stœchiométrie permettrait de faire un lien réel entre l'écologie et le cadre physico-chimique. Pour cela il faudrait travailler sur les mêmes sites en Écologie et en Géosciences.

D. Faure : il faudrait essayer d'avoir une recherche plus systématique.

L. Abbadie : il faut faire de l'innovation conceptuelle pour répondre à la demande sociale. Il faut se battre sur le concept même de l'agroécologie. Le CNRS se doit de se poser cette question.

■ Sol ressource menacée

J.-P. Ambrosi : les sols agricoles sont particulièrement menacés par l'érosion, le tassement, la salinisation et l'urbanisation.

J. Poulenc : il importe de croiser les questions sociétales et d'autres domaines scientifiques dont la sédimentologie et la géomorphologie.

■ Sols urbains - technosols

C. Leyval : Nous utilisons des sols anciens, mais, il faudra construire des nouveaux sols. Besoin de la connaissance des processus, et de fonctionnement. Problème de pollutions. Multidisciplinarité possible y inclus les SHS. Une seule unité travaille sur ces questions. Le CNRS a sa place.

■ Sols/santé

Y. Moenne-Loccoz : biologistes de l'INRA pour la santé animale.

P. Oliva : migration des pathogènes dans les sols.

G. Freschet : prise en compte de la multifonctionnalité des écosystèmes.

Étant considérés la richesse du débat et l'enthousiasme des participants à échanger, le relevé de notes peut avoir omis certaines interventions.

Quelle formation pour les chercheurs ?

J. Poulenard (EDYTEM)

■ Bilan actuel

Une dizaine de formations Masters, hors Masters-Pro explicitement « Sols et eau ».

Masters sans le terme « Sol », mais avec un fort volet « sol »-zone critique → une autre dizaine de formations. En fait, si l'on fait la somme BOP + Sciences de la Terre, on arrive à environ entre 20 et 30 formations de Master. Mais l'offre est spatialement et thématiquement assez dispersée.

Environ 540 thèses soutenues en France depuis 2009 avec sol dans le titre et les mots clés. Si on trie un peu plus, on arrive à 320 thèses soutenues depuis 2009, mais avec une dynamique décroissante.

Domaines en tête ; Géologie (91) et Biologie (70).

■ Évolution du système

Nouvelle mention des Masters (Bulletin Officiel de février 2014). On verra en fait le sol apparaître de manière moins explicite dans les nouvelles formations.

Dispersion de l'offre de formation ? Points forts/points faibles

Renouveler nos offres de formation sur le sol et la zone critique ?

Comment assurer la transmission des connaissances d'hier et d'aujourd'hui ?

Comment assurer plus d'échanges au niveau des ED ?

Créer des écoles thématiques récurrentes au CNRS pour la formation des chercheurs et doctorants ?

Discussion

S. Derenne : quid des Grandes Écoles d'Agronomie ? Elles sont aussi formatrices en Sciences du Sol.

J. Martins : pourquoi avoir supprimé le Génie mécanique de cette analyse ?

La formation sur les sols existe toujours, mais elle est dispersée, et sera pixélisée.

P. Oliva : il existe une vraie rivalité entre les Masters Pro et les Masters Recherche.

J.-P. Ambrosi : idem à Marseille.

P. Oliva : demandes d'enseignement en Sciences du Sol, en Écologie et Génie Mécanique.

P. Barré : la mutualisation au niveau des ED pourrait être une bonne idée.

J. Poulenard : le CNRS peut être force de proposition.

L. Abbadie : il faut se battre pour maintenir des parcours cohérents ou rendre l'objet sol, attractif. Il faut le rendre attractif très tôt. Il faut aussi s'intéresser au parcours pro des CMI qui doivent s'appuyer sur la recherche.

P. Oliva : il a été possible de faire évoluer la perception du sol et son attractivité pour les étudiants. Mais, se pose le problème des coûts de terrain qui sont nécessaires à la formation (et son attractivité) mais sont de moins en moins assumés par les universités d'année en année.

N. Arnaud : il faut l'organisation d'un réseau national de compétences et d'échanges, sans se tirer dans les pattes les uns des autres.

D. Faure : il faut penser aux écoles thématiques du CNRS, en imaginant des choses tournant tous les ans.

C. Leyval : nous avons vraiment la nécessité d'inclure des approches pluridisciplinaires.

J.-P. Ambrosi : des écoles de terrain ont également été organisées par l'IRD. Il devient de plus en plus difficile d'enseigner pour certains chercheurs, alors que cela était plus facile auparavant (dans certains cas, frilosité des enseignants-chercheurs).

Éléments de prospective :

débat introduit et animé par C. Valentin

(IEES-Paris)

■ Les observatoires français de la zone critique – J. Gaillardet (IPGP)

La zone critique, n'est ni un concept nouveau, ni un objet scientifique nouveau mais il est fédérateur. Du point de vue fondamental : c'est l'interface de l'atmosphère, de la lithosphère, le l'hydrosphère et de la biosphère. C'est une zone de réactions caractérisée par diverses périodes de temps. Du point de vue appliqué, c'est la zone sur laquelle l'humanité vit, se développe, se nourrit, stocke ses déchets. C'est un réacteur bio-physico-chimique traversé par des flux de matière et d'énergie. Cette zone est une des couches critiques de la planète mais elle aussi critique car c'est notre milieu de vie et que ses équilibres ont été rompus par les activités humaines (cf. Bruno Latour, «Some advantages of the notion of Critical Zone »).

Cette zone n'est pas étudiée par une seule communauté, mais plusieurs groupes de scientifiques s'y intéressent qui n'ont pas forcément tous la même question. C'est un obstacle. La zone critique est le carrefour de disciplines et à trop avoir spécialisé, on rate une approche holistique de la zone critique.

La zone critique est l'interface. Elle est traversée par un flux d'énergie et d'eau.

Notion d'observation sur le long terme: a) pour élucider les mécanismes à l'œuvre dans la zone critique, approche tout à fait complémentaire de l'expérimentation, b) pour suivre sur des temps très longs l'évolution d'un système qui est soumis à un forçage majeur.

Richesse des observatoires de la zone critique. Il faut favoriser les réseaux, l'observatoire élémentaire étant considéré comme un nœud d'un réseau plus global, qui permet de séparer les variables lorsque l'expérimentation n'est pas possible.

En France, nous sommes très riches en infrastructures de recherche de la zone critique, mais les observations sont dictées par des questions de recherche trop spécifiques et pas assez génériques.

Exemple du réseau RBV : il faudrait ajouter une dimension biologique.

Une présentation des différents SO est faite. Tous ces observatoires ont une question unique : savons nous modéliser, donc reproduire et prévoir la réponse de ce réacteur bio-physico-chimique qu'est la Zone Critique à des changements environnementaux dont les périodes de temps vont de la seconde au million d'années ? Les bassins versants sont représentatifs d'un ou de plusieurs processus, ce qui suppose qu'au delà de l'hétérogénéité, il existe des propriétés émergentes. La question corollaire est donc : a-t-on choisi les bons bassins versants ?

Il faudrait pouvoir définir un corpus de données communes : du statut d'ORE localisé à une « métrique » commune de la zone critique (mesures atmosphériques: retombées sèches et humides, paramètres climatiques, paramètres édaphiques, paramètres des eaux profondes, flux d'eau à l'exutoire (à quelle fréquence ?), mesures des flux de matières (dissous et solides), occupation des sols, caractérisation « géométrique » de nos sites. Pour RBV, 20 paramètres importants communs seront mesurés partout.

Les observatoires de la zone critique peuvent-ils être des lieux où s'opèrent les couplages entre disciplines ?

Complémentarité ZA/SO. Travailler à l'intersection ZA/SO avec un dénominateur commun = le long terme. Il faudrait une structure nationale type IR sur l'Observation de la surface de la Terre.

L'intersection entre ZA et ZC doit être regardée en fonction du long terme (Atelier versus Observatoire), des zones géographiques (Alpes, Garonne, Bretagne, Jura...) et des questions scientifiques adressées avec pour les SO du CNRS-INSU, des questions centrées sur les processus, les flux de matière, les modèles des surfaces terrestres (où l'Homme est une variable parmi d'autres). Alors que pour les ZA du CNRS-InEE, les questions de recherche sont centrées sur l'Homme et la société.

Si l'on envisage des recommandations : il faudrait proposer de travailler à l'intersection entre ZA et SO des Surfaces et Interfaces Continentales avec un dénominateur commun qui serait le long terme. Ceci ne pourrait se faire qu'en allant au

Éléments de prospective ; débat introduit et animé par C. Valentin (IEES-Paris)

moyen d'une volonté partagée vers une structure nationale de type Infrastructure de Recherche sur l'Observation de la Terre *sensu lato*.

Des questions plus globales pourraient alors être envisagées du type de : comment l'altération des minéraux et la formation des argiles communiquent-elles avec l'appauvrissement de l'écosystème en carbone et en nutriments, le tout étant conditionné par la pente, le climat et les événements extrêmes ?

Discussion

C. Leyval : la dimension bio existe dans les ZA.

F. Arnaud : il y a t-il trop ou pas assez d'observatoires ?

J. Gaillardet : il n'y en a pas trop, mais il faut les organiser. Il faut revenir aux questions fondamentales.

F. Arnaud : se pose néanmoins le problème de la comparaison des données.

J. Gaillardet : le CNRS a répondu (juillet 2014) parmi 20 autres partenaires à un appel à propositions dans H2020 à une Task « LTER *versus* SO »¹².

F. Arnaud : on ne peut faire l'économie d'une analyse économique des SO, notamment quant à leur possibilité d'ouverture.

N. Arnaud : il faudrait une remise à plat du fonctionnement des SOERE pour redonner aux opérateurs la maîtrise et donc proposer une nouvelle phase de re-labellisation.

Il faudrait également pouvoir obtenir une modification du décret des CNAP ? Assurer des moyens pérennes ; et donc glisser vers une proposition d'Infrastructure de Recherche. Des propositions seront faites par AllEnvi en ce sens avec une forte pression du CNRS.

■ Instrumentation - J.-P. Ambrosi (CEREGE)

Les études de sol impliquent des moyens d'observation pluri-échelles et implicitement pluri-instrumentaux pour envisager une compréhension globale avec une prise en compte multi-paramètres des processus et mécanismes.

Présentation d'une application à l'étude multi-échelle du transfert de métaux à l'interface Sol/Plante.

Se pose alors concernant l'instrumentation, la question de la programmation, du financement, et donc de la pérennité de cette instrumentation et des moyens de support (AllEnvi, CNRS-

¹² - Ce projet a été retenu en janvier 2015.

InEE, CNRS-INSU, Mission pour l'Interdisciplinarité – MI...)? La question sous-jacente étant la question de leur structuration au niveau national (via les DEFIS de la MI ; MASTODONS, NANO, Instrumentation aux limites, ENRS, ENVIROMICS, les Projets Exploratoires de Premier Soutien (PEPS) de site ou en réseau et les plateformes de réseau, TGIR, IR, EQUIPEX).

La communauté « Sol » est-elle suffisamment structurée au regard du problème de l'instrumentation ? Relationnel versus Compétition. Chacun son site ! Son instrument ! Son approche !

Les défis (MI) = Verrous techniques : bio-senseurs, capteurs, chaîne du froid pour conservation, kit d'extraction en micro-biologie.

Il faudrait viser un rapprochement des compétences et des objectifs entre les a) disciplines et b) les échelles d'observation. Idéalement, la clarification des objectifs et des questionnements devrait permettre d'augmenter la lisibilité des sites.

Le problème de la pérennité des plateformes se pose (ex Commission mi-lourds du CNRS-INSU *versus* dotation fixe ou proportionnelle), ainsi que celui de la pérennité des techniques et du savoir-faire et donc de la transmission, très fortement liés au recrutement (accroissement du nombre de contractuels).

Il faudrait pouvoir s'inscrire en ce qui concerne l'instrumentation dans une vraie visibilité et durabilité des actions incluant la gestion des sites, l'expérimentation et la mesure ? Dès lors, il faudrait peut être des comités de pilotage pluridisciplinaires avec des appels à propositions.

Une école interdisciplinaire centrée sur la problématique « Sol » pourrait être envisagée afin de favoriser les échanges et savoir « qui fait quoi, comment et pourquoi ? ».

Discussion

C. Valentin : quid de la gestion des échantillons et des bases de données ?

J. Poulenard : il faudrait s'associer au GIS SOL pour cela.

P. Oliva : la question de la centralisation du stockage des échantillons étrangers potentiellement pathogènes se pose.

■ Modélisation - Y. Goddérés (GET)

Il existe deux types de modèles : des reconstructions physiques intégrées versus des approches purement phénoménologiques. La bonne voie se trouve sans doute au milieu (ex : modèles en boîtes avec lois d'échange)...

L'expérimentation en mésocosmes couplées à des mesures de terrain peut permettre de calibrer et valider les modèles.

Des couplages de modèles sont également nécessaires en prenant en compte la stationnarité des états ou les dynamiques temporelles.

Peut-on vraiment déduire des généralités ?

Quel est le rôle des sols dans le couplage érosion/altération ?

Il faut comprendre comment les argiles fonctionnent pour comprendre les fronts d'altération.

Il faut aboutir à une hiérarchisation des processus et paramètres en jeu parmi lesquels : l'hydrologie (flux d'eau, contenu, évapotranspiration), les interactions Eau-Minéraux (minéralogie, comportements cinétiques proches de l'équilibre, constantes thermodynamiques), les interactions minéraux-vivant (rôle des végétaux sur l'hydrologie, mycorhizes, micro-organismes), climat (température, précipitations), érosion physique et zone critique.

Discussion

J. Poulenard : que penser du modèle SoilGen ? Réponse : finalement, ce n'est pas si mal.

Y. Goddéris : il faudrait pouvoir prendre en compte le problème de la nucléation des argiles.

J.-P. Ambrosi : il faudrait aussi intégrer à cette modélisation des modèles comme KINDIS (B. Fritz).



Leçons à tirer des journées

Conclusions

Cette réflexion a été souhaitée par le CNRS, avec la volonté de privilégier les contacts avec les jeunes chercheurs qui constitueront le cœur de la communauté en pointe sur ces questions dans la prochaine décennie. C'est donc dans cette logique qu'un certain nombre de jeunes recrutés ont été invités à cette réunion pour nous présenter leur vision des études à conduire sur les sols. Force est d'admettre que les contributions des différents participants à ces journées ont été d'une grande qualité, alimentant efficacement un débat passionnant.

À l'aune des discussions de ces deux journées d'échange, des analyses bibliométriques réalisées et du bilan des forces vives du CNRS effectué, un certain nombre de constats se dégagent clairement, même si l'analyse bibliométrique a cependant montré des limites puisque l'objectif est resté non normatif, tous les domaines n'ayant pas le même poids et de grands champs échappant à cette analyse.

Le CNRS doit clairement mieux se positionner sur les actions de recherche conduites sur les sols, car, bien que publiant beaucoup sur le sujet, le CNRS apparaît nationalement peu lisible sur cette thématique de recherche, notamment vis-à-vis d'autres organismes (INRA, IRD, IRSTEA, BRGM...). Les chercheurs CNRS n'affichent sans doute pas assez « l'objet Sol » dans leurs thématiques de recherche, même si pour beaucoup il est au cœur de leurs travaux.

Le CNRS publie plus que l'INRA dans le domaine des sols, mais les domaines de recherche en tête ne sont pas les mêmes. L'INRA publie majoritairement sur le thème Agriculture, alors qu'au CNRS le thème qui ressort en premier est : « Environmental Sciences Ecology ».

L'approche « Géosciences » est un plus du CNRS par rapport à l'INRA. La géologie *sensu lato* s'est emparée du sol au CNRS entre 2008 et 2013 avec une part « Agriculture » qui diminue au CNRS entre 2008 et 2013.

Il s'agit pour le CNRS dans ces questions de recherche relatives au sol, de privilégier les pistes de recherche innovantes sur lesquelles il pourra faire valoir ses spécificités, notamment en termes de transdisciplinarité, afin de lui permettre de se positionner sur cette question dans le paysage national, mais en mettant en avant ses atouts et missions spécifiques.

Nous souhaitons également aborder le problème de la formation actuelle en Sciences du Sol, afin de réfléchir à la façon dont les formations forment, ou pas, les chercheurs de demain à la prise en compte de ces questions scientifiques, et

comment la synergie entre Formation et Recherche pourrait être renforcée dans ces domaines. Les liens entre formation en Sciences du Sol et Recherche ne se trouvent pas facilités en raison d'une offre spatialement et thématiquement assez dispersée. La nouvelle offre de formation n'ira pas vers une amélioration.

La Recherche de demain ne peut se concevoir sans lui associer une analyse fine des outils dont elle a besoin pour être optimale dans ses résultats. Il s'agissait donc également de replacer nos propositions en perspective des outils nécessaires, tant en observation qu'en expérimentation ou en analyse, en montrant comment les outils existants, sont soit à la disposition de la communauté, soit restent à inventer ou à mutualiser.

Il ressort également de nos échanges que dans la manière de l'aborder, le sol est vu par le CNRS, tout autant comme une sorte de courroie de transmission majeure des grands cycles (C, nutriments, H₂O, contaminants...), des liens entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes, ou entre changement climatique et aléas (crues), qu'un enjeu en termes de ressources menacées, de traitement de déchets et une matrice de support d'innovation (Génétique, Microbiologie, Microchimie, Géophysique...).

Des verrous à lever

Malgré sa belle diversité et son opiniâtreté, notre communauté se heurte à un certain nombre de verrous scientifiques, méthodologiques ou instrumentaux concernant la connaissance du fonctionnement et de la dynamique spatiale et temporelle des sols. Parmi ceux-ci, on peut évoquer dans le désordre et de manière sans doute non exhaustive, les verrous suivants.

■ Sol - Milieu vivant

- Il faut préciser la définition la plus appropriée du terme « Qualité des sols » pour quel « service » : diversités et fonctions biologiques des sols,
- L'identification du lien entre diversité biologique et fonctionnement des sols ; un prérequis est une meilleure connaissance du vivant dans les sols,
- La mise en œuvre de nouvelles techniques d'isolement/cultures des organismes du sol en complément des techniques omiques afin de répondre à la question précédente et de développer de véritables approches d'ingénierie écologique associant les microorganismes,
- La prise en compte des rétroactions du vivant sur le sol et donc le climat puisque le sol est un objet d'intérêt majeur au regard de ses interactions avec le climat *via* le cycle du C,
- La représentativité des analyses et la caractérisation de certains compartiments de la matière organique des sols (hydrophile, azotée),
- La difficulté de l'appréhension de l'hétérogénéité du sol ; limite des outils d'échantillonnage des micro-organismes (diversité) : analyse de la présence et de l'expression génique de bactéries *in situ*,
- Le rôle des apports organiques sur la structuration spatiale des sols, sur les communautés microbiennes et donc sur l'écodynamique et la biodisponibilité des contaminants.

■ Dynamiques spatio-temporelles

- La hiérarchisation de l'importance des processus observés dans le temps et dans l'espace (« hot spots » / « hot moments »).
- Une mauvaise prise en compte du facteur temps, ou comment étudier l'évolution du fonctionnement biologique du sol à différents pas de temps ?

- Les lieux et jeux des réactions d'altération dans le milieu naturel.
- L'extension verticale des réactions d'altération (géométrie des structures d'altération, propagation dans l'espace et dans le temps).
- La prise en compte de l'héritage et le poly-phasage des processus de formation des sols.
- Les constantes de temps des processus de formation et dégradation des sols.
- Les mécanismes contrôlant la propagation des fronts d'altération, et les limites de la zone active en termes de processus et de flux.

■ Sols et contaminants

- La question de la recherche de processus fondamentaux dans des situations de terrain avec des pollutions historiques assorties de faibles disponibilités.
- La compréhension de la dynamique des contaminations multiples impliquant des multi-stress (nutritionnel, changement climatique, salinité, dégradation physique).
- Les indicateurs, capteurs environnementaux, bio-senseurs *in situ* à développer, et surtout comment et avec quels types de nouveaux partenaires que ceux de notre communauté.
- L'identification des rôles respectifs des processus biotiques et abiotiques dans le devenir des contaminants dans les sols.
- L'optimisation des processus de remédiation,
- Le rôle précis du transfert accéléré des polluants par les colloïdes (bactéries, matière organique, argiles...) dans les sols et vers les autres compartiments de l'écosystème (ex : eaux souterraines, eaux de surface).
- La prise en compte des interactions physiques et/ou

chimiques des polluants avec le milieu qui entraînent une réduction ou une augmentation de leur dynamique.

- La compréhension des processus en jeu dans les interactions sol/polluants émergents (composés halogénés, nanoparticules manufacturées...).

■ Expérimentations

- Le problème du traitement et de la centralisation des données : base de données « sols » ?
- Il faut développer des dispositifs de suivi de l'état de santé des sols, de leur bilan genèse/érosion, de leur charge en carbone et de leurs émissions des gaz à effets de serre avec les instrumentations nécessaires, et ce, à différentes échelles (si les études à micro-, à la nano-échelle et aux plus grandes échelles existent, il manque l'analyse de la méso-échelle).
- La notion de « Sol de référence » ?
- La formation de nouveaux sols/écosystèmes.

- Expérimentation *in situ* (prise en compte de la globalité des paramètres environnementaux) versus expérimentation *ex situ* en conditions contrôlées (identification et hiérarchisation des processus élémentaires en jeu).

■ Modélisation

- Une représentation trop simpliste des sols dans des modèles globaux.
- La prise en compte des distributions verticales du C dans les modèles.
- Il existe peu d'indicateurs qualifiant les sols pour les modèles économiques à caractère décisionnel.
- La représentativité réelle des processus identifiés et l'extraction potentielle sous-jacente de lois globales.
- La représentation du vivant (structure, dynamique, interaction et fonction) dans les modèles.
- La modélisation des interactions contaminants/sols/microorganismes/eau.

Vers une mobilisation accrue des ressources du CNRS

■ Objectif global

Il nous faut apprendre à modéliser, donc reproduire et prévoir la réponse de ce réacteur bio-physico-chimique qu'est le sol ; interface centrale de la Zone Critique à des changements environnementaux dont les pas de temps vont de la seconde au million d'années. Il manque une approche holistique de la zone critique. La zone critique est l'interface clé de la dynamique des surfaces continentales traversée par un flux d'énergie et d'eau et fortement impactée par les activités humaines. Ceci ne peut s'envisager sans des approches interdisciplinaires permettant le développement d'outils intégrateurs et d'approches intégrées couplant observation de terrain, expérimentation et modélisation. Il s'agit donc aussi de travailler aux différentes échelles de temps et d'espace avec les forçages biotiques et abiotiques en jeu.

■ Interactions entre les communautés

Il faudrait essayer de rapprocher les spécialistes des flux et des processus (géochimistes) et les spécialistes de stœchiométrie écologique afin d'appréhender la diversité des fonctions jouées par les sols. Ce rapprochement est nécessaire afin d'avancer pleinement sur la question clé du lien entre diversité biologique et fonctionnement des sols, et d'aborder la relation dynamique épigée/hypogée en adoptant une vision plus intégrée en allant jusqu'aux racines profondes.

Il faudrait développer des concepts innovants afin de répondre à la demande sociale. Ceci est par exemple le cas en ce qui concerne le concept même de l'agroécologie. Le CNRS se doit d'afficher pleinement cette ambition. Dans cette optique, il faudrait viser un rapprochement des compétences et des objectifs entre les disciplines et les échelles d'observation. Nous devrions travailler sur les mêmes sites en Écologie et en Géoscience avec une recherche plus systémique. Par exemple, la dynamique des contaminants et leurs impacts sur les écosystèmes (écotoxicologie) nécessitent d'intégrer pleinement les interactions Eau/Sol/Nappe. Idéalement, la clarification des objectifs et des questionnements devrait permettre

d'augmenter la lisibilité des sites.

En termes d'échelles spatiales, il faut aller aussi vers des études de la parcelle ou du paysage. Cependant, le transfert d'échelle spatiale reste une question de recherche en soi impliquant une hiérarchisation des processus.

Les sols font partie intégrante de territoires façonnés, structurés, gérés, réglementés par les sociétés. Il est impératif dès lors que le CNRS mobilise des chercheurs en Sciences Humaines et Sociales, dans les domaines économiques, juridiques, anthropologiques et archéologiques, pour aborder des questions aussi importantes que le droit foncier, les compétitions d'usages des terres, les questions de compensations écologiques, d'accaparement des terres...

■ Quantification des processus

Afin de vraiment comprendre les trajectoires du sol, les variables d'état du système « Sol », nous devons nous positionner dans des trajectoires temporelles (d'où le développement de paléo-modèles). Il faut définir les phases actives dans les formations anciennes, trouver des phases ou des systèmes spécifiques d'étapes d'altération et pour cela combiner des outils et des approches enregistrant les processus d'altération sur des échelles de temps différentes. En cela, si notre communauté dispose d'une forte compétence sur les outils chronométriques (^{14}C , cosmonucléides, K/Ar, Ar/Ar, paléomagnétisme, OSL, séries de l'U...), il importe cependant de définir le cadre réel d'application de ces outils : signification réelle des âges et des taux d'altération.

■ Points chauds

• Matière organique et cycle du carbone

La matière organique des sols nécessite d'être caractérisée sur le maximum de compartiments possibles (différents poids moléculaires de lipides, fractions séparées physiquement) et les résultats obtenus à différentes échelles doivent être

confrontés. Il faut aussi encourager l'émergence des mesures *in situ* pour l'obtention d'informations moléculaires permettant une analyse précise des processus en jeu. L'enjeu est d'importance car il s'agit de disposer des prérequis essentiels pour prédire la dynamique et la réactivité de la matière organique qui est, à l'heure actuelle, trop peu intégrée dans les modèles. À travers sa réactivité, il s'agit aussi de mieux comprendre ses interactions avec d'autres éléments chimiques (ex : xénobiotiques ou métaux, métalloïdes via les complexes colloïdaux organométalliques), de déterminer les mécanismes de sa stabilisation, et de fournir des recommandations sur les pratiques culturales pour augmenter la fertilité des sols.

En écologie fonctionnelle, il est aussi nécessaire de considérer les pools de matière organique distincts, leurs interactions avec les processus biologiques et le minéral afin d'établir des modèles corrects de recyclage des nutriments lors de la dégradation de la matière organique dans les sols. La présence de matière organique de différentes réactivités dans les sols (ex : litières et exsudats racinaires, produits de la macrofaune) doit aussi être considérée car elle peut affecter significativement la dynamique du C à travers des mécanismes tels que le « priming effect ».

• Cycle et qualité de l'eau

Le sol constitue le compartiment central de la zone critique qui contrôle une grande partie des grands cycles dont celui de l'eau. Les propriétés du sol déterminent la partition de l'eau de pluie entre infiltration, puis le stockage de l'eau dans le sol, et/ou l'alimentation de la nappe, ou le ruissellement générateur d'érosion et de pollutions. Il contrôle non seulement les quantités d'eau dans les différents compartiments, en assurant l'alimentation hydrique de la végétation, mais aussi en régulant le niveau des nappes, les débits de base et les crues. L'hydrologie est dès lors indissociable de la connaissance des sols.

En contrôlant les différents chemins de l'eau, le sol contrôle aussi la qualité de l'eau, du fait de son rôle épurateur, mais aussi comme pourvoyeur de polluants vers les nappes via le drainage, ou les cours d'eau via les écoulements de surface. Ces processus ne sont pas confinés aux sols agricoles, mais aussi aux sols péri-urbains, urbains, sols de friches industriels, sols miniers, et autres technosols.

■ Modélisation

La question de la modélisation est cruciale puisqu'elle nous impose par exemple de ne pas obérer certains processus pour refléter la dynamique du climat. Il faut militer pour des allers-

retours entre terrain, expérimentation et modélisation permettant d'intégrer la modélisation dès la phase d'élaboration de l'étude. Il nous faudra trouver un juste dosage entre une simplification du fonctionnement des sols via des caractéristiques fonctionnelles (notion de « Soil Functional Type ») et une prise en compte fine des processus qui autorise la diversité des sols dans la modélisation, mais qui manque de clarté pour la modélisation à grande échelle. Il faudrait pouvoir arriver à des modélisations plus mécanistes. Il faut aussi prendre en compte les COVs dans les modèles. La notion de sols modèles ne fait pas l'unanimité. Ce n'est pas la panacée ; il faut aussi privilégier l'étude de gradients permettant de tester *in situ* l'influence de variables de forçage. Il serait préférable de partager des sites d'observation plutôt que des sols modèles.

De nombreuses équipes ont recours à la modélisation dans différents domaines ayant trait au sol (p. ex. LTHE en hydrodynamique et érosion, iEES-Paris en écologie des sols, GET en paléoclimats), il reste que le CNRS n'a pas lancé de plateforme intégratrice comme le « sol virtuel » de l'INRA.

■ Outils

Concernant les outils, il importe :

- de conserver nécessairement un intérêt pour les différentes approches (lysimètres, écotrons...),
- de mettre en réseau ces différents dispositifs (ZA, BV, lysimètres...), et ce, qu'ils soient labellisés ou non,
- de gérer plus efficacement les données et les échantillons.

Il faudrait pouvoir s'inscrire en ce qui concerne l'instrumentation dans une vraie visibilité et durabilité des actions incluant la gestion des sites, l'expérimentation et la mesure.

Importance des observatoires. L'inventaire des bassins versants, de leur problématique et des paramètres suivis a été réalisé au sein du SOERE RBV. Comme le révèle l'analyse des pré-propositions reçues par l'ANR dans le domaine des sols, ces réseaux (RBV, ZA) ont jusqu'ici assez peu réussi à stimuler les interactions entre observatoires pour rédiger des projets communs sur l'évolution des sols à long terme. Toutefois cette dynamique est lancée au sein du SOERE RBV et devrait déboucher sur la soumission de pré-propositions fédératrices. La plupart des observatoires sont non seulement des lieux de suivis à long terme mais aussi d'expérimentations. Au demeurant, la plupart des publications issues de ces observatoires portent sur des expérimentations, plutôt que sur des suivis à long terme, parfois plus difficiles à valoriser. À la connaissance des animateurs du RTP Sols, il n'existe pas de démarche équivalente pour les écotrons.

■ Partenariats

L'analyse du partenariat du CNRS sur les questions scientifiques traitant du sol montre, malgré un domaine de recherche peu visible au CNRS, des effectifs relativement importants, avec à la fois une assez forte dispersion mais de réelles possibilités de synergies régionales et nationales. Elle pose la question des relations avec l'INRA, l'IRSTEA et les Travaux Publics. Malgré l'absence de partenariat fort type UMR entre le CNRS et la communauté « Sol » de l'INRA puisque l'INRA privilégie son autonomie scientifique sur ces questions, il serait sans doute judicieux d'essayer de favoriser des associations sous d'autres formes avec l'INRA (Fédération de Recherche, OSU, actions programmatiques...). Ce genre de lien avec une communauté INRA très structurée sur le sol pourrait permettre au CNRS de se positionner sur cette question dans le paysage national, mais en mettant en avant ses atouts et missions spécifiques. Ce type de rapprochement de compétences et disciplines, pourrait contribuer à la structuration de notre communauté nationale « Sol »/« Zone Critique »/« Zone Atelier », véritable réseau national de compétences et d'échanges permettant de renforcer sa place au niveau international.

■ Enseignement - Formation

Plusieurs participants à cette rencontre ont évoqué des propositions d'écoles d'été/écoles thématiques/workshops sur diverses thématiques parmi lesquelles : « les constantes de temps des processus d'altération ».

Il est nécessaire de se battre pour maintenir des parcours cohérents ou/et rendre attractif l'objet sol. Il faut le rendre attractif très tôt. Il faut aussi s'intéresser au parcours pro des CMI qui doivent s'appuyer sur la recherche. Le CNRS doit constituer une force de propositions vis-à-vis du MESR pour des formations cohérentes au niveau régional, voire national, avec des facilités de mobilités entre universités, non seulement pour les enseignements mais aussi pour les étudiants.

■ Perspectives

Le sol est le siège de l'accommodation du vivant (systèmes racinaires superficiels et profonds, macrofaune, micro-organismes...) via des stratégies bio-géo-chimiques très originales. Ce vivant est par rétroaction, un acteur fondamental de la dynamique du sol. On ne peut donc caractériser le sol qu'en décrivant et étudiant son vivant. Ce thème est un axe original du CNRS (« Environmental Sciences and Ecology »). Un certain nombre de points doivent être abordés en priorité

Pour favoriser la prise en compte du vivant dans la modélisation, parmi lesquels nous pouvons citer : la dynamique et la relation structure-fonction du vivant dans les sols (diversité et structure fonctionnelle du vivant), les mécanismes biotiques et abiotiques conduisant à l'accumulation/déstockage de C dans les sols, les relations entre la structure moléculaire de la matière organique du sol et la dynamique du vivant, les relations entre mondes épigé et hypogé et le rôle pivot des plantes, la dimension spatiale du sol (architecture souterraine avec laquelle le vivant va composer) ou les couplages des cycles avec les processus biogéochimiques. Le sol est aussi un objet majeur d'intérêt au regard de ses interactions avec le climat. Les rétroactions du vivant sur le sol et donc le climat ne sont pas suffisamment prises en compte. Il y a donc une véritable urgence à avancer sur ces questions scientifiques. Notons sur cette thématique, le dépôt d'une proposition « Soil Biota » pour un appel potentiel Horizon 2020 portée par 16 pays dont en France le CNRS, l'INRA et le CEA afin de mieux connaître la diversité et les fonctions du vivant dans les sols. Ce projet a été retenu en janvier 2015.

Un autre des points forts du CNRS se trouve dans une forte activité de recherche dans les Géosciences, la prise en compte des temps longs, les grands cycles et les modèles. Il existe une forte communauté Climat et une forte communauté Sol en France. C'est un atout ! D'autant plus que l'appétit est fort de mieux comprendre le sol pour alimenter les modèles, y compris ceux de l'évolution des climats du passé. Les modèles idéaux n'existant pas, le CNRS doit rester attentif à combiner intelligemment des reconstructions physiques intégrées et des approches purement phénoménologiques. Il peut dans ce cadre jouer un rôle majeur.

Le sol constitue une ressource à préserver car menacée (érosion, tassement, acidification, salinisation, pollution, urbanisation...). Le sol est également central dans la question de la qualité et de la quantité de l'eau. Force est d'admettre qu'à la différence d'autres organismes, le CNRS a une carte à jouer dans la mesure où il n'est pas cantonné aux territoires agricoles.

Les écosystèmes terrestres sont fortement affectés par les activités humaines et les changements globaux. Aussi, les sols très anthropisés sont soumis à de fortes pressions, d'où une diminution de la surface des sols cultivables. En conséquence, des sols sont délaissés (contaminés, friches) alors que le développement des populations humaines nécessite leur réutilisation. Se posent alors les questions de restauration des propriétés et re-fonctionnalisation des sols, voire de reconstruction de nouveaux sols. Ceci requiert des connaissances amont très fondamentales des processus et dynamiques de fonctionne-

ment. Dans ce contexte, les compétences très pluridisciplinaires du CNRS (dont les SHS) devraient l'inciter à s'emparer d'études nouvelles dédiées aux sols urbains, péri-urbains et aux technosols entreprises sur le Long terme.

Le CNRS ne doit pas non plus rester insensible à la dispersion, voire à la « pixélisation » de l'offre de formation en sciences du sol et de la désaffection que celle-ci pourrait provoquer sur ces questions de recherche fondamentalement et socialement majeures. La solution passe sans doute par de plus grands échanges au niveau des écoles doctorales et pourrait être accompagnée par la création d'écoles thématiques du CNRS.

D'un point de vue des moyens, l'efficacité du CNRS à s'emparer de ces questions serait amplifiée si notre communauté pouvait travailler à l'intersection entre Zones Ateliers et Systèmes d'Observation des Surfaces et Interfaces Continentales avec un dénominateur commun qui serait le long terme. Ceci ne pourrait se faire qu'au moyen d'une volonté partagée vers une structure nationale de type Infrastructure de Recherche sur l'Observation de la Terre *sensu lato*. Seul ce type de structuration pourrait assurer les moyens pérennes requis pour travailler sur le long terme. Une modification du décret des CNAP pourrait aussi être proposée pour renforcer cette dynamique de structuration plus globale à l'échelle du CNRS.



Annexes

Annexe 1

Lettre de mission

Dossier suivi par :
 Gudrun BORNETTE (INEE)
Gudrun.bornette@cnrs-dir.fr
 Nicolas ARNAUD (INSU)
Nicolas.arnaud@cnrs-dir.fr

A l'attention de :

Florian Mermillo-Blondin
 Fabien Arnaud
 Denis FAURE
 Christian Valentin
 Aline Dia
 Jérôme GAILLARDET

Paris, le 15 Mai 2013

Objet : RTP Sols

Chère et chers collègues

Nous vous remercions d'avoir accepté de participer à cet effort de réflexion et de prospective dédié aux sols. Au moment où démarre votre groupe de travail, nous tenons à vous préciser les éléments qui nous semblent fondamentaux dans la démarche que vous avez entreprise.

Nous attendons en priorité un travail prospectif qui, s'ajoutant aux résultats du travail de prospectives de l'INEE et des attendus du colloque de prospective SIC 2013, proposera des pistes de recherche innovantes. Vous pourrez apprécier le terme de « sol » dans son acception la plus large, tant dans l'espace que dans le temps en insistant justement sur les couplages d'échelle des processus. Vous prendrez naturellement en compte la production des efforts de prospective existants, notamment ceux de l'alliance ALLENI, mais vous aurez à cœur de privilégier des pistes de recherche sur lesquelles le CNRS pourra faire valoir ses spécificités, notamment en terme de transdisciplinarité. Cela devrait permettre d'impliquer toutes les communautés scientifiques du CNRS dans cette réflexion. Il importe que vos propositions permettent au CNRS de se positionner sur cette question dans le paysage national, en synergie avec ses partenaires institutionnels également engagés sur cette problématique, mais en mettant en avant ses atouts et missions spécifiques.

Bien que ce ne soit pas le cœur du travail que nous attendons de vous, vous devrez replacer vos proposition en perspective avec les outils nécessaires, tant en observation et analyse qu'en expérimentation, en montrant comment les outils existant, et sont à disposition de la communauté, ou restent à inventer ou à mutualiser.

Vous devrez enfin réfléchir à la façon dont les formations actuelles forment, ou pas, les futurs chercheurs demain à prise en compte de ces questions scientifiques, et comment la synergie entre formation et recherche pourrait être renforcée dans ces domaines.

Vous pourrez bien sûr faire appel à toutes les compétences nécessaires à vos travaux au-delà du CNRS, en privilégiant les contacts avec les jeunes équipes et les chercheurs qui constitueront selon vous le cœur de la communauté en pointe sur ces questions dans la prochaine décennie.

Votre travail donnera lieu à un exercice de restitution via un colloque dédié et, éventuellement, une publication sous un format qui reste à définir par votre groupe.



www.cnrs.fr

Campus Gérard-Méry
 3, rue Michel-Ange
 75794 Paris cedex 16

01 44 96 40 00
 01 44 96 53 90

Dépassez les frontières
 Advancing the frontiers

Pour mener cette réflexion votre groupe aura le temps nécessaire à son travail et nous vous garantissons notre soutien financier permettant vos réunions pour les prochains 18 mois.

Nous attendons pour la fin du mois de mai 2013 une proposition de calendrier opérationnel de votre groupe, et vos premières réflexions d'organisation de votre travail et de livrables.

Soyez assuré de notre soutien constant, et nous nous rapprocherons régulièrement de vous pour constater l'avancement de vos travaux.

Très cordialement



N. ARNAUD
en charge du domaine SIC

INSU



G. BORNETTE
DAS en charge des infrastructures de
recherche

INEE

Annexe 2

Objectifs, tâches et jalons du RTP Sols

■ La lettre de mission du 15 mai 2013 identifie cinq principaux objectifs :

- Privilégier les pistes de recherche sur lesquelles le CNRS pourra faire valoir ses spécificités et forces (par rapport aux autres organismes), notamment en termes de transdisciplinarité et de sa capacité à impliquer toutes les communautés scientifiques du CNRS dans cette réflexion.
- Replacer vos propositions en perspective avec les outils nécessaires, tant en observation qu'en expérimentation ou analyse, en montrant comment les outils existant, sont soit, à la disposition de la communauté soit, restent à inventer ou à mutualiser.
- Réfléchir à la façon dont les formations actuelles forment, ou pas, les futurs chercheurs de demain à la prise en compte de ces questions scientifiques, et comment la synergie entre formation et recherche pourrait être renforcée dans ces domaines.
- Privilégier les contacts avec les jeunes équipes et les chercheurs qui constitueront le cœur de la communauté en pointe sur ces questions dans la prochaine décennie.
- Préparer un colloque dédié, et, éventuellement une publication.

■ Durée de la mission : 18 mois

■ Ces cinq principaux objectifs ont conduit à envisager les tâches suivantes :

- | | | | |
|-------------|---|--------------|--|
| WP 1 | Remise du calendrier d'exécution et proposition du cadre de travail incluant les propositions de « Workpackages », jalons et « livrables ». | WP 3 | Inventaire des équipes actuelles du CNRS et de ses outils mis à disposition des investigations conduites dans le domaine des sols. |
| WP 2 | Analyse des exercices précédents menés dans le domaine des sols (<i>sensu lato</i>) au CNRS, en France (AllEnvi, ANR, etc.) et à l'international. | WP 4 | Analyse bibliométrique sur les cinq dernières années en vue de l'identification des forces et faiblesses du CNRS. |
| | | WP 5 | Analyse des projets de recherche dans les dossiers de concours CR et DR des candidats au CNRS en section 20, puis 30 dans ce domaine depuis les cinq dernières années. |
| | | WP 6 | Première synthèse de cet inventaire et des différentes analyses, permettant de cibler les thèmes et les équipes à consulter de manière plus approfondie. |
| | | WP 7 | Consultation des chercheurs et des équipes identifiées à l'étape précédente, sous forme de visites de laboratoires, d'instruments et de réunions. |
| | | WP 8 | Discussions avec le Ministère de l'Éducation Nationale et de la Recherche sur la question de la formation au niveau de l'enseignement supérieur et identification de pistes de propositions pour redynamiser la formation dans ce domaine en montrant l'intérêt double pour le domaine académique, dont le CNRS, avec une source potentielle de futurs chercheurs sur ces thématiques et la formation de futurs vrais professionnels du domaine des sols dans un contexte de protection de la ressource Sol. |
| | | WP 9 | Préparation du colloque dédié. |
| | | WP 10 | Colloque. |
| | | WP 11 | Rédaction du document final avec des propositions en termes de priorisation des thèmes de recherche, notamment des « hot spots » à forte plus-value en terme de gain de connaissance fondamentale, des moyens à mettre en œuvre et des dispositifs et/ou maquettes de formation (avec si possible des interactions avec le MESR). |
| | | WP 12 | Publication d'un article de synthèse destiné notamment aux étudiants (p. ex. « La Recherche »). |

Annexe 3

Participants aux journées du RTP Sols

La réunion débute à 10h par un rapide tour de table de présentation des thématiques d'intérêt et de recherche des participants.

G. Bornette (DAS CNRS-InEE) et N. Arnaud (DAS CNRS-INSU) : tous deux à l'initiative du lancement de cette réflexion inter-instituts.

F. Arnaud (Cycle de l'érosion sur l'Holocène), D. Faure (Écologie de la rhizosphère), J. Gaillardet (Dynamique géochimique de la Zone Critique), F. Mermillod-Blondin (Écologie fonctionnelle des interfaces Eau/Sédiment), C. Valentin (Pédologie, états de surface et érosion des sols) et A. Dia (Processus et dynamique des ETM à l'interface Eau/Sol/Bactérie) : les organisateurs de cette réflexion, mandatés en ce sens par l'InEE et l'INSU du CNRS.

■ Participants invités

- L. Abbadie (Écologie)
- J.-P. Ambrosi (Dynamique des ETM interface Eau/Sol/Plante)
- P. Barré (Dynamique du carbone et interactions organo-minérales dans les sols)
- J. Bouchez (Altération et grands cycles)
- F. Chabaux (Géochimie de la Zone Critique et datation des processus)
- S. Derenne (Caractérisation moléculaire de la matière organique)
- G. Freschet (Écologie fonctionnelle, couple Sol/Plante)
- B. Guenet (Rôle du sol dans la modélisation du climat)
- C. Leyval (Interactions Sol/Plantes/Microorganismes et écodynamique des polluants)
- P. Oliva (Pédologie, mécanismes et transferts d'ETM et nutriments dans les sols)
- J. Martins (Transfert réactif de contaminants dans les sols et écotoxicologie)
- C. Monard (Microbiologie du sol)
- J. Poulénard (Sciences du sol, pédologie, utilisation des archives pour mettre du temps dans la connaissance des sols.)

Coordination éditoriale

Dominique Armand

Impression

Imprimé par TPI sur du papier issu de forêts gérées durablement.



Conception

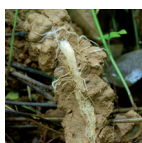
Trait de caractère(s)

Maquette

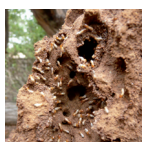
Page B

Juillet 2015

■ Légendes de la mosaïque de couverture



Turricules de vers de terre, Viêt-Nam. © IEES, Pascal Jouquet



Termitières, Inde. © IEES, Pascal Jouquet



Mégaravines (lavakas), Madagascar. © IEES, Christian Valentin



Ruissellement en nappe, Laos. © GET, Olivier Ribolzi

Livre blanc



Centre National de la Recherche Scientifique
3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16