

PEPR SolsVivants – Appel à idées : Quelle(s) action(s) de recherche proposez-vous pour contribuer au programme ?

Le PEPR SolsVivants – « *Comprendre les interactions dans les sols pour agir* » – fait partie de la nouvelle génération de programmes coordonnés par l’agence Agralife (INRAE). Ce nouveau PEPR doit démarrer au printemps 2026, après contractualisation. Il est doté d’un budget de 9 M€ sur 5 ans (2026-2030), et copiloté par INRAE et le CNRS. Le PEPR SolsVivants a pour objectif principal de produire des connaissances empiriques et théoriques sur le rôle des organismes du sol et de leurs multiples réseaux d’interaction dans la multifonctionnalité des sols pour une diversité de types de sols, d’usages et de modes de gestion, afin de faire face aux enjeux de préservation et d’amélioration de la santé des sols. Quatre défis scientifiques ont été identifiés (cf. Annexe 1).

Le PEPR SolsVivants a pour ambition d’analyser de manière intégrative les liens entre communautés d’organismes du sol, des plantes, et fonctionnement des sols, en structurant et animant la communauté scientifique nationale en sciences du sol, écologie, agroécologie, biogéochimie, ainsi qu’en soutenant financièrement deux projets ciblés (PC) ambitieux. Ces deux projets ciblés en construction (cf. Annexe 2) concernent :

- **PC1 – Réseaux d’interactions dans les sols.** Ils incluent les interactions trophiques et non trophiques impliquant l’ensemble des communautés d’organismes du sol et de plantes.
- **PC2 – Impact des interactions biotiques dans les sols sur la multifonctionnalité des sols.** Un accent particulier sera mis sur deux ensembles de fonctions :
 - Structuration du sol et transferts d’eau, de gaz, de solutés et de particules de sol.
 - Transformations impliquées dans les cycles biogéochimiques de C, N, P et autres nutriments.

Pour ces deux projets ciblés, ce seront des approches d’observation (sur des territoires-observatoires tempérés et tropicaux et sur des dispositifs existants d’observation-expérimentation de long terme – cf. Annexe 3) et de modélisation qui seront *a priori* privilégiées. Ils porteront sur une diversité d’usages des sols et sur un continuum de pratiques ou systèmes de gestion.

Quatre axes d’animation transverse seront mis en place (cf. Annexe 4), et feront l’objet chacun d’un groupe de travail (GT) :

- GT 1 – Développer des recherches multi-taxa.
- GT 2 – Faire le lien entre approches empiriques et théoriques.
- GT 3 – Explorer des scénarios de changements environnementaux découlant d’activités anthropiques (changement climatique, d’usage des terres, du niveau d’intensification, etc.).
- GT 4 – Créer des synergies entre les spécialistes du sol travaillant dans les environnements tempérés et tropicaux.

Le PEPR SolsVivants ne lancera pas d’Appel à Projets. Cependant, en vue d’élaborer le contenu détaillé des actions de recherche et d’animation du PEPR, le Comité de Pilotage (cf. Annexe 5) du programme désire s’appuyer sur une consultation de la communauté scientifique, via le présent **Appel à idées : « Quelle(s) action(s) de recherche proposez-vous pour contribuer au programme ? »**. Vos réponses permettront de compléter la cartographie des compétences scientifiques et techniques mobilisables, d’identifier les possibles sites d’étude et approches qui pourraient être intégrées dans les actions de recherche et d’animation du PEPR SolsVivants. Il est attendu que le programme de travail soit défini de façon détaillée en amont de la contractualisation du PEPR, celle-ci devant avoir lieu d’ici le 8 mars 2026. Le Comité de Pilotage de SolsVivants pourra pour cela s’appuyer sur l’ensemble des **propositions qui lui seront parvenues au plus tard le 10 décembre 2025**.

Un webinaire de présentation du PEPR aura lieu le 1^{er} décembre 2025 à 14h00 (inscription : <https://lime3-app2.sorbonne-universite.fr/index.php/256849?lang=fr>)

QUELLE EST VOTRE IDEE EN VUE DE CONTRIBUER AU PEPR SOLS VIVANTS ?

Trame du questionnaire à remplir en ligne

| | | | |
|----------------------|---------------------------------|--------|----------|
| Porteur.se de l'idée | Nom | Prénom | Email |
| Employeur et statut | Unité, tutelle, % d'implication | | Statut : |

A quel(s) projet(s) ciblé(s) (CP) et lot(s) de travail (WP) se rattache votre proposition ?

N.B. il est tout à fait possible de ne s'impliquer que dans l'animation transversale (tableau ci-dessous)

| PC1 – Réseaux d'interaction dans les sols |
|---|
| WP 1.1 : Etude des réseaux d'interactions trophiques des sols |
| WP 1.2 : Réseaux d'interactions non trophiques dans les sols |
| WP 1.3 : Traits fonctionnels des taxa du sol |
| WP 1.4 : Impact des activités anthropiques sur les réseaux d'interactions |
| PC2 – Impact des interactions biotiques dans les sols sur la multifonctionnalité des sols |
| WP 2.1 : Rôle des interactions biotiques au sein des sols dans les fonctions de structuration du sol et de transfert d'eau, de gaz, de solutés et de particules de sol |
| WP 2.2 : Rôle des interactions biotiques au sein des sols dans les fonctions de transformation impliquées dans les cycles biogéochimiques de C, N, P et autres nutriments |
| WP 2.3 : Impact des activités anthropiques sur la multifonctionnalité des sols |
| WP 2.4 : Modélisation du fonctionnement biotique des sols |

Le cas échéant, à quel(s) axe(s) transverse(s) ou groupe(s) de travail (GT) souhaiteriez-vous prendre part ?

| |
|--|
| GT 1 – Développer des recherches multi-taxa |
| GT 2 – Faire le lien entre approches empiriques et théoriques |
| GT 3 – Explorer des scénarios de changements environnementaux |
| GT 4 – Créer des synergies entre les spécialistes du sol travaillant dans les environnements tempérés et tropicaux |

1. Quelle est votre idée d'action de recherche ? Thématische et originalité (<10 lignes)

Indiquer succinctement le positionnement thématique par rapport à l'état de l'art, en précisant la/les question.s de recherche principale.s que vous proposez d'aborder, les verrous qui seront levés et la nature de l'action de recherche à conduire pour y parvenir. Il est important de préciser en quoi votre idée est originale et en mesure de s'inscrire dans l'ambition du PEPR SolsVivants, et en quoi elle n'entre pas déjà dans d'autres PEPR ou programmes nationaux ou européens.

2. Eléments de contexte justifiant le choix du des territoire/site.s d'étude ou de l'approche de modélisation proposée (<10 lignes)

Si votre approche relève d'une démarche d'observation, préciser le territoire ou la région d'étude – en zone tempérée (France) ou tropicale (pays/région) – que vous souhaitez privilégier. Décrire à grands traits ses caractéristiques : type(s) de sol, type(s) d'usage et mode(s) de gestion, historique de suivi et données disponibles, partenaires non académiques. Si l'approche s'appuie sur des dispositifs d'observation-expérimentation de long terme, les décrire (âge de l'expérimentation, facteurs manipulés, données déjà disponibles etc.)

Si votre approche relève plutôt d'une démarche de modélisation, indiquer la nature du modèle envisagé, les bases de données et ontologies à mobiliser. Dans les deux cas, préciser les possibles synergies ou complémentarités avec d'autres projets ou PEPR en cours.

3. Approches et compétences mobilisées (quelques lignes par rubrique)

Il conviendra ici de préciser les **démarches / méthodologies** mobilisées, ainsi que les **compétences / dispositifs / partenariats** envisagés, à la fois **au sein de votre propre unité**, mais aussi **auprès d'unités partenaires**. *Pour rappel, un enjeu du PEPR et de structurer la communauté scientifique et de stimuler l'émergence d'interactions nouvelles au sein de celle-ci.*

■ ■ Démarches / méthodologies

■ ■ Unité(s) et principaux.ales scientifiques et autres personnels impliqué.e.s, en précisant leurs affiliations respectives et leurs taux d'implication dans l'action de recherche proposée

■ ■ Disciplines scientifiques et compétences techniques mobilisées

4. Livrables (< 5 lignes)

Il conviendra ici de préciser la nature des **livrables envisagés**, et du **public ciblé**.

Lien de soumission :

<https://lime3-app2.sorbonne-universite.fr/index.php/642751?lang=fr>

Deadline : le 10 décembre 2025 à minuit

ANNEXE 1 – Les quatre défis scientifiques du PEPR Sols Vivants

■ ■ Les forçages environnementaux liés aux activités humaines altèrent à la fois la matrice organo-minérale du sol, les organismes qui construisent et maintiennent la structure et la composition des sols, et les interactions biotiques – abiotiques qui sous-tendent les fonctions écologiques des sols nécessaires au bon fonctionnement des écosystèmes : les cycles des nutriments, la régulation des flux d'eau, le stockage du carbone, la régulation des contaminants et des bioagresseurs, la régulation du climat, etc. La préservation des sols et de la biodiversité qu'ils hébergent, la restauration de leurs fonctions lorsqu'elles sont dégradées, représentent donc un enjeu majeur, des milieux naturels aux milieux anthropisés (espaces agricoles, forêts, milieux (péri)urbains), que ce soit en conditions tempérées sur le territoire métropolitain français, ou plus largement sur l'ensemble des sols de la planète. Cependant de nombreux défis et lacunes scientifiques nécessitent d'être comblés pour faire face à cet enjeu.

Défi 1 - Développer l'approche réseaux d'interactions sur l'ensemble des taxa du sol

Les sols abritent la majeure partie de la biodiversité taxonomique et fonctionnelle terrestre, mais celle-ci est encore largement méconnue. L'étendue de cette diversité est telle, depuis les microorganismes jusqu'aux macro-invertébrés, que la recherche sur les organismes du sol, en France comme dans le reste du monde, s'est structurée en sous-disciplines basées sur la taille des taxa considérés : l'écologie microbienne (au sein de laquelle on peut distinguer les approches sur les bactéries, archées, champignons, protistes et virus), l'écologie de la microfaune, de la mésofaune et de la macrofaune des sols. En conséquence, dans les études sur les liens entre biodiversité des sols et fonctionnement des écosystèmes, la dimension multi-taxa, regroupant ensemble et quantitativement plusieurs de ces grands taxa, est quasi absente dans les approches descriptives, expérimentales ou théoriques. Par exemple, les projets européens portant sur la qualité des sols ont recours à l'élaboration d'indicateurs fondés sur un nombre très limité de ces taxa, et ignorent la diversité de rôles fonctionnels des différents grands taxa, et par conséquent les complémentarités et antagonismes entre taxa. Les expériences d'inoculation au champ d'invertébrés du sol ne reposent ainsi généralement que sur un seul taxon. En conséquence, la vision développée ne permet pas de faire le lien entre biodiversité, qui est par définition multi-taxa, et fonctionnement. Cette dynamique a abouti à un cloisonnement des connaissances et des dynamiques de recherche, qui constitue maintenant un verrou scientifique majeur pour aller vers une compréhension plus intégrative du fonctionnement des sols, incluant les interactions entre grands taxa. Il faut donc réaliser un effort substantiel pour rassembler les différentes sous-communautés françaises travaillant sur les organismes du sol afin d'être en mesure d'intégrer l'ensemble des grands taxa du sol dans un cadre unificateur reposant sur les réseaux d'interactions et leurs liens au fonctionnement des sols.

Défi 2 - Intégrer les organismes du sol dans les modèles de fonctionnement des sols et des écosystèmes, et évaluer leur rôle dans la multifonctionnalité des sols

Modéliser le fonctionnement des sols et des écosystèmes est un enjeu important pour être en mesure de comprendre ces systèmes vivants et complexes, ainsi que pour explorer des scénarios de forçages environnementaux s'inscrivant dans le cadre des changements globaux. A l'heure actuelle, les modèles sont soit très spécialisés sur un taxon du sol en particulier, par exemple la bioturbation par une espèce de vers de terre, soit très généraux en mode "boîte noire" et n'incluent au mieux que quelques paramètres biotiques des sols tels que, par exemple, la biomasse microbienne pour représenter les microorganismes du sol de manière simplifiée (ex. KEYLINK et Century). Aucun de ces modèles ne considère la biodiversité microbienne ou l'existence et le rôle potentiellement important des autres taxa peuplant les sols. En conséquence, il est difficile de modéliser l'impact des changements globaux, modifications du paysage, pollutions, ou au contraire le potentiel de la transition agroécologique, par exemple via la diversification des cultures et couverts végétaux, sur les communautés des organismes du sol pour en déduire les effets sur le fonctionnement des sols, les flux d'eau et de nutriments et le climat. Un effort important doit être mené en ce sens en créant un lien fort entre approches empiriques multi-taxa, identifiées dans le défi 1, et modélisation, pour développer une nouvelle génération de modèles plus holistiques. Des efforts particuliers sont nécessaires pour inclure les organismes des sols dans des modèles de fonctionnement des écosystèmes prenant en compte le sol suffisamment finement pour prédire les rétroactions entre sols-organismes, sols-végétation et changements globaux. La France est particulièrement bien placée pour relever ce défi grâce à son important vivier de scientifiques mobilisant des systèmes d'observation et des expérimentations permettant des approches de modélisation à plusieurs échelles, aussi bien empiriques que déterministes.

Défi 3 - Mettre à l'épreuve les connaissances en écologie des sols face à la diversité des sols, de leurs usages et de leurs modes de gestion à l'échelle d'un territoire

Mettre en application les connaissances scientifiques sur le fonctionnement des sols au niveau d'un territoire est complexe du fait que les couvertures pédologiques, les usages des terres et les systèmes ou pratiques de gestion présentent une variabilité spatiale et temporelle élevée et créent autant de configurations susceptibles d'affecter la

biodiversité et le fonctionnement des sols de manière spécifique. En conséquence, notre capacité à transférer nos connaissances à des pas spatiaux et temporels plus larges, embrassant la variabilité pédoclimatique considérable du territoire français, avec une vision dynamique, reste faible et constitue un verrou majeur pour développer une politique ambitieuse de transition écologique à l'échelle territoriale ou nationale. Si des progrès considérables en matière de compréhension des mécanismes d'interaction au sein des réseaux d'organismes du sol ont été permis avec des approches expérimentales en conditions contrôlées, au travers d'expérimentations *in natura*, et par le monitoring de systèmes innovants, il est aujourd'hui important de passer à l'échelle et d'éprouver nos connaissances dans des gammes de situations plus diversifiées, croisant types de sols et forçages anthropiques liés à l'usage de sols et aux modalités de gestion des écosystèmes, telles qu'elles se rencontrent et co-existent à l'échelle de territoires de quelques km² à quelques milliers de km². Ce passage à l'échelle est particulièrement important en ce qui concerne notre compréhension des liens entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes, en particulier les interactions entre groupes biologiques et les interactions biotiques – abiotiques, dans un cadre holistique. En outre, en se positionnant dans de tels territoires, des échanges fructueux de savoir peuvent se nouer avec une diversité d'acteurs. Cela ouvre la possibilité d'évaluer la perception du sol et de sa composante biologique par les divers porteurs d'enjeux, et de les sensibiliser aux enjeux associés.

Défi 4 : Faire dialoguer davantage les disciplines et la diversité des acteurs concernés par le fonctionnement des sols

Alors que la France accueille des recherches de haut niveau sur les sols, la communauté scientifique française demeure morcelée et mériterait d'être davantage structurée de manière à relever les défis scientifiques précédemment cités. Il faut en particulier amplifier les synergies entre les différentes disciplines portant sur le sol (chimie, physique, écologie des différents groupes, etc.). Un défi organisationnel important est donc de décloisonner ces disciplines pour faire dialoguer ensemble les différentes communautés travaillant sur les sols dans des contextes différents (agricoles, forestiers, urbains, en milieu tempéré ou tropical, etc.). C'est particulièrement important en écologie du sol, pour promouvoir les échanges entre les spécialistes des différents groupes d'organismes du sol, *a fortiori* dans l'objectif de progresser sur la compréhension des réseaux d'interactions entre ces organismes et leurs liens avec le fonctionnement du sol. Dans la perspective d'une approche holistique des sols et des fonctions ou services écosystémiques qu'ils assurent, l'enjeu d'interdisciplinarité dépasse bien entendu le champ des sciences du sol. Développer une vision plus intégrative du fonctionnement des sols et des écosystèmes passe à la fois par la consolidation d'interfaces multiples avec des disciplines scientifiques telles que l'écologie, l'agronomie, voire les sciences humaines et sociales et par la promotion de la transdisciplinarité ; il s'agit en effet de mobiliser également les connaissances empiriques des acteurs des socio-écosystèmes dans lesquels le programme de travail sera déployé. Ce défi sera relevé principalement grâce à une animation transverse du PEPR SolsVivants.

ANNEXE 2 – Les deux projets ciblés du PEPR SolsVivants

Le PEPR SolsVivants s'appuie sur deux projets ciblés, PC1 et PC2, dans l'objectif de relever les quatre défis scientifiques qu'il a identifiés (cf. Annexe 1).

Projet Ciblé 1 (PC1) - Réseaux d'interactions dans les sols

■ ■ Les organismes du sol sont généralement impliqués simultanément dans des interactions de natures variées, trophiques ou non trophiques, qui sont souvent différentes selon le stade de croissance des organismes. Ces interactions dans les sols ont été jusqu'ici étudiées dans des cadres conceptuels séparés, l'écologie des réseaux trophiques (préation, herbivorie, décomposition), et l'écologie non trophique (en particulier les ingénieurs de l'écosystème), de sorte qu'il manque à l'heure actuelle un cadre permettant de relier ces deux grands types d'interactions dans un cadre unifié. Le PEPR SolsVivants développera ce cadre en construisant une approche réseaux multicouches, où les interactions peuvent être de natures variées et changeantes le long des stades de vie des organismes. Ce Projet Ciblé vise à caractériser ces interactions et à les intégrer dans des modèles théoriques de fonctionnement du sol, dans l'optique de relever le Défi 1. L'étude des interactions entre les organismes du sol et avec la matrice du sol est déjà riche, mais plusieurs fronts scientifiques restent encore peu explorés, ou sont en pleine émergence. Forte de sa large communauté de chercheurs en écologie des sols, la France est bien positionnée pour se placer en leader sur quatre lots de travail (WPs) de recherche qui seront développés dans ce Projet Ciblé du PEPR SolsVivants.

WP 1.1 : Réseaux d'interactions trophiques des sols

Les réseaux trophiques dans les sols incluent une série d'interactions complexes entre producteurs (plantes), consommateurs (herbivores, détritivores et prédateurs) et décomposeurs (bactéries, champignons). Ces réseaux sont essentiels pour la régulation des flux de nutriments et la décomposition de la matière organique, avec des conséquences importantes sur les flux au cœur des cycles biogéochimiques, y compris les gaz à effets de serre. Le rôle trophique des organismes du sol est donc primordial, à la fois via des effets de régulation de populations du sol et donc d'activités assurées par les proies, mais également par le contrôle indirect des flux de respiration, de consommation et d'excrétion du carbone et des autres nutriments au sein des communautés d'organismes du sol. Lorsque ce rôle est correctement identifié, il est possible d'inclure les organismes dans des modèles théoriques simulant les dynamiques de populations et les fonctions associées.

Contrairement aux milieux aquatiques, où le rôle trophique des organismes peut être correctement inféré à partir de traits simples tels que la taille corporelle, le rôle trophique des organismes du sol reste difficile à prédire, et est encore largement inconnu. Par exemple, le rôle de certains taxa tels que les archées, les protistes (comme les amibes et les ciliés) et les virus dans les réseaux trophiques reste relativement inexploré. Leurs interactions avec d'autres organismes du sol (bactéries, champignons, plantes), en particulier la régulation par la préation des populations microbiennes (bactériophages) ou des champignons (mycovirus) sont des sujets de recherche encore peu développés alors qu'ils pourraient jouer un rôle majeur dans les dynamiques des réseaux trophiques. Une question centrale est le degré de spécificité de ces interactions, car il conditionne le niveau de redondance entre taxa et *in fine* le lien entre biodiversité et fonctionnement. En particulier, le degré d'omnivorie fait toujours débat, en partie du fait que la préation de certains taxa comme les protistes, les champignons ou les algues reste largement inconnue. Le degré de géophagie des espèces est également un angle mort dans ces études, alors que cela a un lien direct avec l'état et le fonctionnement des sols. Le PEPR SolsVivants est une occasion unique pour décrire de manière fine et réaliste ces réseaux d'interactions trophiques. En effet, affiner la description des réseaux trophiques du sol est une tâche complexe qui nécessite un investissement significatif dont l'ampleur ne rentre pas dans le cadre des appels d'offres habituels.

Faute de cet investissement, la grande majorité des approches classiques pour décrire les réseaux trophiques repose non pas sur l'observation des interactions elles-mêmes, mais sur des approches indirectes. La biogéochimie isotopique a été beaucoup utilisée mais est clairement limitée par le fait qu'elle ne permet pas d'identifier la gamme des ressources consommées et ne permet pas de construire les réseaux d'interactions précis. Une approche plus récente est l'observation des cooccurrences entre taxa par metabarcoding suivie d'une inférence des interactions basée sur des règles d'interaction simples reposant sur les traits des espèces. Cette approche reste sujette à caution d'une part car le metabarcoding n'estime pas les abondances et d'autre part parce qu'elle n'est pas basée sur des observations empiriques d'interactions, ce qui constitue une limite majeure.

Action ciblée du WP 1.1

Le PEPR SolsVivants lèvera les limitations précédentes en développant un suivi massif des interactions trophiques elles-mêmes dans les sols, principalement par l'analyse génomique des ressources ingérées par les taxa du sol. Cela se fera sous la forme de metabarcoding moléculaire du contenu stomacal d'individus, lorsque cela est

possible, ou par analyse totale de l'ADN corporel et des fèces des consommateurs lorsque les organismes sont trop petits. Cette approche sera possible grâce aux avancées récentes, et à venir dans le PEPR DynaBiod sur la couverture taxonomique des bases génomiques de plantes et d'invertébrés. Des prototypes de suivi d'interactions par scanners enterrés, récemment développés conjointement par le CIRAD et INRAE, seront également mis en place sur quelques sites d'étude pour tester la validité des prédictions basées sur les approches de cooccurrence. Les organismes étudiés proviendront à la fois de collections d'échantillons existantes et d'individus collectés sur les sites du RMQS Biodiversité et sur les sites des territoires-observatoires ciblés. Il s'agira cependant d'aller au-delà des approches fondées sur les réseaux de cooccurrence.

WP 1.2 : Réseaux d'interactions non trophiques dans les sols

De nombreuses interactions dans les sols impactent également le fonctionnement des sols et des écosystèmes de manière non trophique. Celles-ci impliquent des mécanismes variés tels que la création d'habitat par modification physique et chimique du milieu. En particulier, les ingénieurs des sols, comme les vers de terre, fourmis, termites et les plantes, via leurs racines, créent de nombreuses biostructures qui sont de véritables mini-écosystèmes et représentent des hot spots de diversité taxonomique et fonctionnelle. Certains organismes jouent également un rôle important sur la croissance et la santé des plantes, en rendant disponibles les nutriments des sols pour les végétaux. Les plantes façonnent également de manière spécifique les communautés d'organismes du sol à travers la rhizosphère et la litière qu'elles produisent. Les racines activent les communautés de microorganismes via leurs rhizodépôts, modifient la structure physique du sol en créant des micro-agrégats et de la porosité, un facteur crucial pour la survie des organismes du sol. La matière organique, issue des racines et de la litière, fournit les substances organiques à la base des réseaux trophiques bruns, et modifie la chimie du sol (stœchiométrie), en influençant les rapports d'abondance des nutriments disponibles pour les organismes du sol. Enfin, la rhizosphère des plantes héberge également des communautés de décomposeurs spécifiques.

Cependant la diversité des organismes à l'origine de ces effets non trophiques, la spécificité de ces effets, et la gamme des organismes et processus qui en dépendent restent mal connues. En effet, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de cartographie de ces effets, de sorte qu'il est difficile d'en faire le bilan, et de prédire d'une part les espèces clés qui jouent un rôle multifonctionnel, et d'autre part les impacts en cascade sur des processus non trophiques de la perte ou de l'arrivée d'espèces clés de voûte. Pourtant de nombreuses études existent sur le sujet, mais portent principalement sur le rôle des organismes du sol sur la croissance des plantes. Elles ont porté jusqu'ici uniquement sur l'effet de taxa isolés, typiquement l'effet d'une ou deux espèces de vers de terre sur la production primaire en pots. Faire la synthèse de ces études dans une approche réseaux d'interactions est une étape innovante et relativement facile à réaliser en regard de la disponibilité des études sur le sujet. En revanche, les autres interactions non trophiques ont été nettement moins étudiées et demandent un nouvel effort observationnel.

Action ciblée du WP 1.2

Ce WP du PEPR SolsVivants se focalise sur la cartographie de l'ensemble des interactions non trophiques afin d'établir la typologie des interactions bénéfiques ou antagonistes entre les organismes et leur impact sur les processus de fonctionnement du sol. Ces interactions seront formalisées sous la forme d'un réseau d'interactions orientées multicouches. Dans cette formalisation, chaque couche correspond à une fonction écologique, c'est à dire un mécanisme écologique, et la base de données d'interactions sera implémentée sous la forme d'un tenseur, une extension des réseaux d'interactions bipartites, où les taxa seront les covariants et les fonctions les contravariants. Cela pourra permettre par exemple d'estimer le niveau de spécificité, ou au contraire d'ubiquité de ces interactions et d'identifier certains organismes clés de voûte qui jouent un rôle multifonctionnel non trophique dans le fonctionnement des sols et des écosystèmes.

*L'action commencera par une synthèse des interactions non trophiques menée à partir de la littérature dans le cadre d'un groupe de travail. Ceci permettra d'identifier les manques de connaissances et orientera une seconde partie qui consistera en une campagne de nouvelles mesures *in situ* et en laboratoire. Par exemple, le maintien de la biodiversité des sols par effet oasis des ingénieurs du sol et des racines sera abordé en déterminant par ADN environnemental quels taxa du sol sont abrités dans les biostructures de quels invertébrés, ou associés à la rhizosphère de quelles espèces végétales. Le résultat de cette action sera la construction d'un tenseur d'interaction entre taxa et fonctions. Ce tenseur sera complété par les résultats du WP 1.1 sur les réseaux trophiques, qui seront intégrés sous la forme d'une couche supplémentaire dans le réseau. A l'issue du programme, un tenseur d'interactions trophiques et non trophiques sera disponible et directement mobilisable pour explorer la dimension multifonctionnelle des communautés du sol, échantillonées sur le terrain ou simulées dans les modèles de fonctionnement biotique des sols.*

WP 1.3 : Traits fonctionnels des taxa du sol

Afin de pouvoir intégrer les taxa dans le modèle de fonctionnement biotique des sols, il faut non seulement décrire les interactions entre organismes, mais aussi intégrer leurs traits. En effet, ces traits déterminent l'intensité des processus qui découlent des interactions. Les traits proposés ci-dessous à titre d'exemples concernent la faune du sol. Pour les communautés microbiennes du sol, il conviendra de mobiliser, sur la base de la littérature et des bases de données existantes, les traits les plus pertinents par rapport aux fonctions ciblées dans le PC2, ou de proposer des approches innovantes pour les identifier.

La taille corporelle des taxa joue un rôle majeur, conditionnant en grande partie les autres traits. Elle détermine en particulier les flux d'ingestion et d'égestion des ressources, ainsi que l'activité de bioturbation. La distribution des classes des tailles à l'échelle des communautés permet non seulement d'inférer l'effet d'une communauté sur les flux, mais permet également d'explorer les mécanismes de réponse des communautés aux forçages environnementaux. Les initiatives consistant à intégrer les données de taille corporelle au niveau inter et intra spécifiques, existantes ou futures, dans une base de données seront encouragées.

Les taux d'ingestion et d'égestion déterminent directement la quantité de ressources consommées et rejetées par les organismes, et donc la quantité de matière qui transite dans les réseaux trophiques. De nombreuses études existent sur le sujet, mais elles n'ont pas été synthétisées, et certains consommateurs ou ressources consommées sont mal documentés. Ils peuvent être mesurés grâce à des expérimentations sur quelques jours en laboratoire. Ils sont fortement dépendants de la taille corporelle des consommateurs, de sorte que balayer une gamme restreinte de taxa par niveau trophique serait suffisant pour alimenter le modèle de fonctionnement biotique des sols.

Enfin, pour étendre le modèle à des éléments autres que le carbone, en particulier N et P, il convient de prendre en compte la composition stœchiométrique du corps et des fèces des consommateurs. La théorie écologique stœchiométrique prédit qu'il existe un lien entre la composition corporelle des consommateurs, leur taille corporelle, et leurs besoins nutritionnels par des effets de co-limitation, de sorte que les consommateurs couplent les cycles du carbone et des nutriments via l'ingestion et l'égestion des ressources. Documenter la composition chimique des organismes du sol représente donc un enjeu important, mais souffre d'un effort insuffisant de mesures. Ces mesures sont faciles à réaliser sur de gros organismes, mais plus difficiles à réaliser sur ceux qui sont petits. Un travail de développement méthodologique est à réaliser sur ces organismes de petite taille, qui permettrait d'ouvrir de nouvelles perspectives dans l'étude des cycles des nutriments autres que le carbone. Des méthodes issues de la géochimie telles que la micro-analyse élémentaire des solides *in situ* sont particulièrement prometteuses pour cela.

Action ciblée du WP 1.3

Le PEPR SolsVivants contribuera à documenter ces traits via plusieurs approches. Pour la faune du sol, premièrement la distribution en classe de taille des organismes des communautés échantillonnées sera systématiquement estimée par analyse d'image automatique, en mobilisant les développements récents mentionnés précédemment. En second lieu, un ensemble d'une cinquantaine de taxa de régimes alimentaires variés seront capturés afin de faire des mesures de mobilité, de taux d'ingestion, d'égestion et de stœchiométrie des fèces, puis seront sacrifiés pour faire des mesures de composition stœchiométrique corporelle. Ceci demandera un développement méthodologique qui pourra être réalisé au sein de plateformes de géochimie. Les données produites seront rassemblées dans la base BETSI ou une base de données interopérable de traits fonctionnels. Pour les communautés microbiennes du sol, il s'agira d'élaborer et mettre en œuvre des approches innovantes pour identifier les traits les plus pertinents par rapport aux fonctions ciblées dans le PC2.

WP 1.4 : Impact des activités anthropiques sur les réseaux d'interactions

Les changements globaux tels que les changements d'usages des terres et de structuration des paysages, ainsi que les pratiques de gestion de ces derniers, constituent un facteur structurant majeur des communautés du sol et de leur fonctionnalité. Ils affectent les communautés du sol via deux mécanismes importants qui devront être étudiés.

En premier lieu, les changements globaux et les pratiques de gestion des écosystèmes agricoles ou forestiers filtrent les espèces et donc les interactions pouvant être présentes dans les écosystèmes, par des mécanismes basés sur la niche écologique. Cet effet de filtre des taxa par l'environnement a été l'objet de très nombreuses études. En revanche l'effet de filtrage des cooccurrences entre taxa, ou motifs plus complexes de taxa, et des fonctions écologiques associées, avec la volonté de considérer une grande gamme de taxa simultanément, depuis les microorganismes jusqu'aux macro-invertébrés commence seulement à être exploré.

En second lieu, les changements globaux et les pratiques de gestion modulent la réalisation des interactions par des mécanismes de plasticité phénotypique des espèces et des interactions. Cette variabilité intraspécifique est

appréhendée en écologie des réseaux par le concept de *rewiring*. Dans les approches des réseaux d'interactions, les interactions sont généralement considérées comme fixes : les interactions ont toujours lieu entre les mêmes nœuds, de sorte que l'environnement ne fait varier la topologie des réseaux que par l'ajout ou la suppression de nœuds (des taxa). Mais il est bien connu en écologie des sols que ces interactions ne sont pas aussi déterminées et peuvent changer en fonction des conditions. Par exemple, les vers de terre peuvent changer de ressource préférentielle en fonction du type de sol. Cette plasticité des interactions est un mécanisme important d'adaptation aux forçages environnementaux, mais reste très peu étudiée du fait de la difficulté d'observation des interactions.

Action ciblée du WP 1.4

Ce WP du PEPR SolsVivants étudiera comment les facteurs environnementaux et anthropiques modulent la multifonctionnalité biologique des sols via deux mécanismes peu étudiés. Par exemple, des analyses des cooccurrences de taxa et motifs de taxa (cooccurrence de plus de deux taxa) pourront être menées sur les échantillons prélevés dans les différents sites ciblés, avec une volonté de considérer tous les grands taxa d'organismes du sol simultanément, afin d'en déduire les interactions et fonctions potentiellement impactées par les changements d'usage des sols et les systèmes ou pratiques de gestion, à la lumière des WP1.1 et 1.2. Une seconde approche consistera à analyser au niveau intraspécifique comment la typologie des interactions identifiées dans les WP 1.1 et 1.2 est modifiée par l'environnement, afin de caractériser le degré d'adaptation des réseaux d'interaction et de fonctions écologiques par rewiring des interactions en réponse aux forçages environnementaux.

Projet Ciblé 2 (PC2) - Impact des interactions biotiques dans les sols sur la multifonctionnalité des sols

■ ■ De nombreux organismes du sol étant hétérotrophes, ils interviennent dans les processus de transformation et d'enfouissement des matières organiques d'origine naturelle ou issues d'activités anthropiques et dans le recyclage des éléments minéraux à travers une grande diversité d'activités, allant de la prédation ou de la fragmentation, de la consommation, de la digestion et de la dégradation enzymatique à la bioturbation. La cinétique des processus de transformation des matières organiques naturelles ou xénobiotiques dépend à la fois de la composition chimique des différentes matières organiques présentes dans le sol et des réseaux d'interactions complexes du sol. L'ensemble de ces actions et interactions, modulées par les matières et les organismes vivants, exerce ainsi des contrôles forts sur le devenir des éléments - carbone, nutriments, contaminants - et donc sur les cycles biogéochimiques. De nombreux organismes modifient même la composante minérale des sols, jouant ainsi sur les interactions organo-minérales et contribuant aux processus d'altération des minéraux. De plus, ces diverses activités participent à l'entretien de la structure du sol, qu'il s'agisse de la microstructure ou de la macrostructure, notamment par des activités de perforation, de bioturbation, de digestion/consolidation et d'agrégation (via la production d'exsudats racinaires et d'exopolysaccharides bactériens, par exemple). En retour, cette structuration des sols exerce des contrôles forts sur le transfert de fluides (eau, solutés, gaz) et l'habitat des organismes. À travers l'ensemble de ces processus et des interactions biotique-abiotique, les organismes du sol constituent, *in fine*, des acteurs majeurs de la genèse et de l'évolution pédogénétique des sols. Enfin, l'importance de ces activités biotiques dans les processus du sol émerge de l'ensemble des interactions biotiques entre organismes du sol (prédation, complémentarité, compétition, facilitation, symbiose mutualiste). Une appréhension holistique des interactions entre les plantes, le sol et les organismes qu'il héberge est donc nécessaire pour mieux comprendre et conceptualiser leurs rôles dans la multifonctionnalité des sols. Ce PC2 vise à appréhender la multifonctionnalité des sols, en intégrant l'impact des organismes qui y vivent et leurs réseaux d'interactions, dans l'optique de relever le Défi 2. Il s'agit pour cela d'analyser conjointement un ensemble de fonctions écologiques des sols. Toutefois, par souci de pragmatisme, compte tenu de la large gamme de fonctions assurées par les sols, il est apparu nécessaire de se restreindre à quelques-unes d'entre elles dans le cadre du PEPR SolsVivants, en ayant en perspective de pouvoir la compléter au-delà du terme du programme. Les deux premiers lots de travail cibleront deux ensembles de fonctions clés dans tous les types d'écosystèmes terrestres : les fonctions de structuration physique des sols (agrégation et création de porosité) en lien avec les transferts de matières dans le WP 2.1 ; les fonctions de transformation des matières impliquées dans la régulation des cycles biogéochimiques du carbone et des nutriments dans le WP 2.2. Le WP 2.3 considérera comment les activités anthropiques impactent la multifonctionnalité des sols, en ciblant ces deux ensembles de fonctions qui occupent en outre un rôle-clé dans la création d'habitats, la formation des sols, la production primaire et la régulation du climat. Les autres fonctions que sont la régulation de bioagresseurs et des contaminants, particulièrement importantes dans les systèmes les plus anthropisés, ne seront pas ciblées en première approche, mais pourront être évaluées ponctuellement, si leur contribution à la multifonctionnalité des sols apparaît essentielle au regard d'autres fonctions écologiques, sur un site donné.

Ce PC2 ambitionne, et plus particulièrement le WP 2.4, d'intégrer les actions et interactions des organismes du sol, des microorganismes aux macro-invertébrés, dans des modèles de fonctionnement des sols ou des écosystèmes. De telles approches permettront de progresser dans la compréhension individuelle des processus biophysiques ou biogéochimiques sous-jacents, mais également dans leurs interactions/couplages, et d'enrichir les modèles existants qui décrivent la genèse et la dynamique spatio-temporelle de la structure des sols et des transferts de matières (eau, solutés, gaz, particules solides) qui en découlent, ainsi que les transformations biogéochimiques qui gouvernent les cycles du carbone et des nutriments. En effet, à ce jour, la plupart des modèles de fonctionnement du sol et des écosystèmes se caractérisent par une faible prise en compte explicite du rôle de l'ensemble de la biocénose des sols.

WP 2.1. Rôle des interactions biotiques au sein des sols dans les fonctions de structuration du sol et de transfert d'eau, de gaz, de solutés et de particules de sol

La structure du sol, c'est-à-dire l'arrangement tridimensionnel des éléments constitutifs du sol à différentes échelles (assemblage de particules élémentaires, d'agrégats, de mottes) contrôle largement les flux de matières (liquides, solides, gazeuses) dans le sol (percolation, lessivage, lixiviation, remontées capillaires, etc.) et à sa surface du sol (infiltration, ruissellement, érosion), ce qui en fait une propriété "clé de voûte" pour comprendre l'évolution des pédosystèmes et le fonctionnement des sols ou leur dégradation. Les acteurs biologiques, par leurs activités, modifient la structure du sol *via* la modulation des constituants et de leurs arrangements et *via* le façonnage de la porosité. Ils augmentent ou diminuent le volume des pores et leur connectivité, par perforation, bioturbation, agrégation/désagrégation, ingestion/digestion. Les organismes vivant dans le sol modifient également la composition même de ce dernier, par exemple par altération de certains minéraux. Ces différents processus à l'origine de modifications de la composition et de la structure sont difficiles à quantifier et actuellement étudiés séparément, souvent par type d'organisme. De plus, une part importante du cycle de l'eau s'effectue à l'interface et dans le compartiment sol qui joue un rôle majeur dans le partage ruissellement / infiltration puis, pour l'eau infiltrée dans le sol, dans le partitionnement percolation / rétention / évapotranspiration. Si les lois physiques décrivant ces transferts sont connues, leur application au sol – milieu poreux multi-échelles, hétérogène et dynamique – reste d'autant plus délicate que certains processus physiques sous la dépendance de processus biologiques – capacité de rétention en eau de structures microbiennes comme les biofilms, rhizodépôts de type mucilage, par exemple – sont actuellement insuffisamment documentés. Leur approfondissement permettrait d'ailleurs une meilleure compréhension du déterminisme de la résistance au stress hydrique dans la rhizosphère. Des progrès sont donc attendus sur la compréhension des relations (et rétroactions) entre bio-porosité et fonctionnement hydrodynamique des sols.

Action ciblée du WP 2.1

SolsVivants s'attachera à déterminer un ensemble de propriétés physiques pérennes contribuant à la caractérisation classique du sol, ainsi qu'un ensemble de propriétés physiques fonctionnelles dynamiques fortement liées à la structure du sol, y compris des proxys de fonctions décrivant sa dynamique ou les processus de transfert qu'elles gouvernent. La mise en relation de l'ensemble de ces variables avec les descripteurs des organismes du sol et de leurs interactions, tels qu'ils seront produits dans le PC1, permettra de définir des patrons se dégageant d'approches statistiques sur de larges jeux de données de terrain. Une telle approche sera mise en œuvre l'ensemble des sites d'étude. Sur un nombre plus limité de sites contrastés, des outils innovants, idéalement non destructifs pourront être déployés pour (i) caractériser de façon approfondie la structure du sol à deux échelles (micro- et macrotomographie, relaxométrie RMN) et ses liens avec des activités de bioturbation ou d'agrégation, (ii) suivre la dynamique de la structure (approches mettant en œuvre des techniques d'acoustique par exemple), et déterminer les propriétés fonctionnelles (outils dérivés de la géophysique pour caractériser le fonctionnement hydrique, ou outils embarqués pour qualifier la stabilité structurale, par exemple).

WP 2.2. Rôle des interactions biotiques au sein des sols dans les fonctions de transformation impliquées dans les cycles biogéochimiques de C, N, P et autres nutriments

Les processus participant à la décomposition des résidus végétaux et à leur transformation graduelle en éléments minéraux et en matière organique du sol contribuent à la fourniture en nutriments et au stockage du carbone dans les sols. Si une meilleure prise en compte de la dégradation microbienne dans ces processus a amélioré notre compréhension de ces transformations ces dix dernières années, les rôles respectifs des autres organismes du sol (par exemple détritivores, microbivores, prédateurs) et de leurs interactions dans ces transformations restent peu étudiés ou intégrés dans les modèles décrivant le fonctionnement biogéochimique des sols. En particulier, les conséquences de la transformation des résidus végétaux ou animaux en déjections par les animaux détritivores (en interaction avec leurs microbiotes intestinaux), dans la minéralisation des nutriments et le stockage du carbone dans les sols devront être élucidées à travers la diversité des organismes détritivores. En outre, les processus d'altération des minéraux du sol et de modifications de leurs propriétés de surface, dont une partie est influencée par les activités des organismes du sol et des végétaux, via leurs racines, contribuent significativement aux cycles

biogéochimiques de nutriments majeurs tels que le phosphore ou le potassium. Par ailleurs, la fixation biologique de l'azote, en particulier sa composante symbiotique, est un processus-clé du cycle biogéochimique de ce nutriment majeur et constitue un levier de premier ordre pour la transition agroécologique. Il convient de mieux intégrer ces processus et leurs interactions avec les autres étapes-clefs du cycle de l'azote dans le sol : nitrification et dénitrification, notamment, dont l'importance dépend en partie des pratiques de gestion des sols et des couverts végétaux dans les systèmes agricoles ou forestiers. Nombre de ces processus écologiques dont le sol est le siège sont peu ou mal pris en compte dans les modèles décrivant le fonctionnement du sol, et *a fortiori* dans des modèles plus intégratifs tels que les modèles de culture par exemple. Leur intégration permettra donc d'améliorer le réalisme de ces modèles.

Action ciblée du WP 2.2

Le PEPR SolsVivants s'attachera à mesurer sur les sites étudiés (sur les mêmes sites que dans les WP 1.1, 1.2 et 2.1) un ensemble de variables ou proxys de fonctions-clés des cycles biogéochimiques de C, N, P et autres nutriments au sein du compartiment sol, telles que des activités de décomposition des résidus animaux et végétaux (dérivés ou non des pratiques d'élevage), des activités enzymatiques des cycles de C, N et P par exemple. A l'instar de l'approche proposée dans le WP 2.1, la mise en relation de ces variables avec les descripteurs des organismes du sol et de leurs interactions, tels qu'ils seront produits dans le PC1, permettra de définir des patrons se dégageant d'approches statistiques multi-variées sur ces larges jeux de données de terrain. Par ailleurs, les données produites permettront d'enrichir les modèles biogéochimiques de fonctionnement du sol, qui se caractérisent pour la plupart par une faible prise en compte explicite du rôle des organismes du sol, voire même de la seule composante microbienne, malgré son rôle incontournable dans nombre de processus biogéochimiques. Sur un nombre plus limité de sites, des approches innovantes pourront éventuellement être déployées (i) pour l'estimation des rhizodépôts ou de la dynamique des litières racinaires ou (ii) pour l'estimation d'activités enzymatiques liées aux cycle de C, N, P au niveau de hot spots tels que la rhizosphère ou la drilosphère via des techniques de zymographie in situ, par exemple. Pour cela, comme sur le volet concernant la modélisation biogéochimique du cycle du carbone, des synergies seront à construire pour capitaliser sur les avancées méthodologiques réalisées dans le cadre du PEPR FairCarboN.

WP 2.3 : Impact des activités anthropiques sur la multifonctionnalité des sols

Comme mentionné plus haut, les changements globaux associés aux activités anthropiques constituent un facteur déterminant des communautés du sol et des fonctions qu'elles assurent. Il s'agira en l'occurrence d'évaluer dans quelle mesure les usages des sols et les systèmes ou pratiques de gestion agricole ou forestière, notamment, influencent l'expression de la gamme des fonctions écologiques prises en compte dans les WP 2.1 et 2.2 du PC2. Sur certains sites, il serait pertinent de prendre en compte une plus large gamme de fonctions écologiques, en particulier des fonctions telles que la régulation des bioagresseurs et la régulation des flux de contaminants. Les mesures et analyses nécessaires pour caractériser ces fonctions sur l'ensemble des sites de SolsVivants ne sont toutefois pas compatibles avec le niveau de financement envisageable aujourd'hui. Le cadre proposé ici pourrait être cependant appliqué à une gamme élargie de fonctions du sol pour une approche plus englobante de la multifonctionnalité des sols, dans le futur (au-delà du PEPR SolsVivants).

Action ciblée du WP 2.3

La diversité des sites étudiés dans le cadre du PEPR SolsVivants doit permettre d'identifier et hiérarchiser les impacts de l'usage des sols et des systèmes ou pratiques de gestion des écosystèmes sur la multifonctionnalité des sols, en particulier via les effets qu'ils exercent sur les communautés d'organismes et réseaux d'interactions du sol. Outre les conclusions qui pourront être tirées d'approches innovantes, par exemple des approches basées sur la théorie des réseaux sur le vaste jeu de données produites par le PEPR SolVivants, il s'agira également de tirer parti d'approches de modélisation, et de la possibilité qu'elles offrent d'élargir encore la gamme des situations rencontrées dans les territoires-observatoires, par exemple en prenant en compte des scénarios de changement climatique et/ou d'usage des sols. Enfin, l'ensemble des résultats de ce WP 2.3 sera mobilisé pour définir des indicateurs de multifonctionnalité, dépendant des caractéristiques/propriétés des organismes vivants. Des gammes de référence de leurs valeurs, en fonction des usages, voire des pratiques, seront identifiées. Si possible, des valeurs seuils qualifiant un/des niveau/x de dégradation des fonctions écologiques pourront être précisées, caractérisant ainsi de façon très intégrative le niveau de santé des sols, ce qui permettra d'identifier les espaces où la perte de biodiversité et/ou de fonctionnalité biologique nécessite des actions de préservation ou de restauration.

WP 2.4 Modélisation du fonctionnement biotique des sols

Comme déjà souligné, pour chacune des interactions et fonctions écologiques mesurées dans les PC 1 et 2, le rôle des racines des végétaux et des organismes du sol allant des microorganismes aux macro-invertébrés, et plus encore

leurs multiples interactions, sont encore largement ignorés dans les modèles décrivant le fonctionnement des sols. Par exemple, ils sont largement sous représentés dans l'ensemble des modèles de fonctionnement du sol hébergés dans la plateforme de modélisation Virtual Soil, dans des modèles de fonctionnement d'écosystèmes comme ORCHIDEE ou dans les modèles de culture des agronomes. Il en va de même des modèles de flux de type "landscape evolution models" comme LandSoil qui pourraient bénéficier grandement de la prise en compte des effets des organismes du sol sur la stabilité structurale ou les états de surface des sols. Ainsi, il est difficile de comprendre la réponse en termes de fonctionnement du sol ou des écosystèmes à des perturbations anthropiques telles que des changements d'usage ou de pratiques, à des effets du changement climatique, ou à la disparition de certains taxons.

Les travaux conduits dans le cadre des PC1 et 2 doivent permettre d'approfondir nos connaissances du rôle des organismes vivants dans le sol et de leurs réseaux d'interaction dans chacune des fonctions étudiées dans les WP 2.1 et 2.2, mais également dans la multifonctionnalité qui en résulte. Celle-ci n'est pas la simple somme des fonctions considérées une à une, compte tenu des interactions multiples entre les processus abiotiques et biotiques sous-jacents. Ainsi, par exemple, une perturbation des communautés d'organismes dans les sols engendre une modification de la structure du sol par des mécanismes trophiques et non trophiques (WP 1.1 et 1.2), et n'affecte pas seulement les processus de transferts de matière, tels qu'ils sont abordés dans le WP 2.1, mais elle peut impacter également les dynamiques des processus biogéochimiques qui font l'objet du WP 2.2. En effet, les conditions d'humidité, de température, de teneur en oxygène, très localisées (à l'échelle de la microstructure), permettent que s'expriment, ou pas, des chaînes de réaction biogéochimiques, telles que des séquences d'oxydation et/ou de réduction. C'est le cas, par exemple, de la chaîne de la dénitritification microbienne qui conduit, selon les cas et notamment selon les conditions d'aération du sol, à la production de N₂O – puissant gaz à effet de serre produit notamment en sols abondamment fertilisés – ou, lorsqu'elle arrive à son terme ultime, à la production de N₂. Par ailleurs, les processus biogéochimiques du sol contribuent tout autant que les processus biophysiques qui gouvernent la dynamique de la structure du sol à la création d'une diversité d'habitats au sein du sol, une fonction écologique majeure dans les écosystèmes terrestres, qui explique sans doute en grande partie l'extrême biodiversité des organismes du sol. Ces quelques exemples illustrent l'intérêt d'approches plus intégratives que ce qui est réalisé en se concentrant sur une fonction-cible à la fois.

Action ciblée du WP 2.4

Un groupe de travail regroupant modélisateurs et empiristes sera organisé pour déterminer comment intégrer les données produites par les PC1 et 2 dans des modèles de fonctionnement des sols et des écosystèmes. Une première partie du travail consistera à identifier les modèles potentiels pouvant intégrer une composante biotique explicite. A l'issue de ce travail, les paramètres à mesurer, les "variables essentielles" seront identifiés, et leurs modalités de mesure seront déterminées. Cela permettra, à titre d'exemple d'étendre le modèle SoMuChFood (Quévreux and Jabot, 2023), actuellement basé uniquement sur les interactions trophiques et les flux de C, en développant la dimension multifonctionnelle des sols. Cela sera réalisé en incluant les flux d'autres nutriments, en particulier l'azote et le phosphore, grâce à des relations stœchiométriques, et d'autre part en incluant d'autres fonctions non trophiques, en particulier la bioturbation et, plus généralement les activités des ingénieurs du sol.

ANNEXE 3 – Les 2 territoires-observatoires du PEPR SolsVivants

■ ■ L'approche de recherche générale retenue pour le PEPR SolsVivants est fondée sur modélisation et observation, cette dernière ciblant deux territoires-observatoires contrastés, et sur la caractérisation fonctionnelle des communautés d'organismes vivant dans le sol, y compris les plantes. Le choix définitif des deux territoires-observatoires sera réalisé sur la base du cahier des charges suivant. Il s'agira de territoires assez vastes (plusieurs centaines à milliers de km²) déjà bien suivis par ailleurs en termes d'usages et de systèmes et pratiques de gestion, pour bénéficier des connaissances et infrastructures déjà existantes, y compris éventuellement des dispositifs d'observation/expérimentation de long terme ; il pourrait ainsi être judicieux de mobiliser des terrains d'étude communs, pour partie, avec des projets des PEPR DynaBiod et FairCarboN ou FORESTT ou avec le RMQS Biodiversité. Ils seront choisis pour représenter des conditions pédoclimatiques contrastées, avec un accent mis sur la diversité des types de sol et d'usages des sols (agricole, forestier, (péri-)urbains, etc.) sur chacun de ces territoires-observatoires, le contraste climatique privilégié étant celui qui opposera les deux territoires : l'un tempéré, l'autre tropical. Chacun sera donc constitué d'une diversité de socio-écosystèmes en vue de couvrir une large gamme d'usages et de systèmes et pratiques de gestion (diversifiés et innovants). Les recherches sur les sols en zones tropicales revêtent une importance cruciale en raison des nombreux défis écologiques, économiques et sociaux que posent ces régions. Les sols tropicaux sont extrêmement variés, mais ils partagent souvent des caractéristiques et des pressions spécifiques au milieu tropical, comme une forte sensibilité à l'érosion, une dégradation rapide sous l'effet des activités humaines, et des interactions complexes avec la biodiversité locale. Les zones tropicales abritent, généralement, une plus grande diversité biologique qu'en milieu tempéré, avec plus d'espèces endémiques et inconnues, ainsi qu'un plus grand contraste entre zones anthroposées et préservées. Le choix de SolsVivants de conduire des recherches en milieu tempéré et tropical est donc motivé par plusieurs intérêts, tant pour la compréhension des dynamiques des sols que pour l'élaboration de solutions durables aux problèmes environnementaux et agricoles mondiaux.

Pour le territoire-observatoire localisé en zone tempérée, le choix pourrait porter sur une des Zones Ateliers de l'infrastructure nationale RZA en France métropolitaine, en lien avec les eLTER au niveau européen. Une autre option pourrait consister à s'appuyer sur des living labs, en particulier en s'articulant avec la dynamique à l'œuvre dans le cadre de la Mission Soil du Programme Cadre Horizon Europe qui visent à établir une centaine de living labs dédiés à la santé des sols à l'échelle européenne. Enfin, le choix des territoires-observatoires pourrait être également raisonné de façon à favoriser des interactions avec d'autres PEPR comme DynaBiod, FairCarboN ou FORESTT ou avec le RMQS Biodiversité, via la mise en commun de sites d'étude.

Plusieurs options existent aussi pour le choix du territoire-observatoire en zone tropicale. Une première option pourrait s'appuyer sur un territoire ultramarin français tel que La Guyane et les Antilles. Cette région abrite plusieurs dispositifs complémentaires où interviennent le CNRS, INRAE et le Cirad, en articulation avec AnaEE France, et l'IRD qui pilote par ailleurs le PEPR OutreMer. Elle est particulièrement intéressante du fait de son appartenance à l'Europe. Elle est à ce titre concernée par la directive cadre européenne sur les sols et nécessitera de faire des adaptations des indicateurs de santé des sols. Par ailleurs, le cadre législatif est identique à la métropole, ce qui faciliterait les comparaisons des leviers mobilisables pour maintenir la santé des sols. Une autre option consisterait à opter pour un territoire étranger, avec par exemple de nombreuses possibilités en Afrique sub-saharienne. Il pourrait être judicieux de faire le lien avec l'initiative INRAE-Cirad TSARA "Transformer les Systèmes Alimentaires et l'Agriculture par la Recherche en partenariat avec l'Afrique" qui a soutenu la mise en place du réseau scientifique sur les sols "Soil Africa". Cette option pourrait bénéficier des interactions avec le Centre d'Excellence Africain sur le Changement Climatique, la Biodiversité et l'Agriculture Durable (CEA-CCBAD/WASCAL) et des compétences locales en écologie des sols pourraient y être mobilisées.

ANNEXE 4 – Les 4 axes d’animation transverse du PEPR SolsVivants

■ ■ La mise en œuvre du PEPR SolsVivants repose sur la construction de consortia inter- et transdisciplinaires mobilisant des acteurs variés dans le cadre d’actions participatives et itératives (Défi 4). Un des enjeux du programme est de fédérer les différentes communautés des sciences des sols, de l’agronomie, de la foresterie, et de l’écologie au sens large, voire des sciences humaines et sociales, (interdisciplinarité), pour favoriser la capitalisation des savoirs respectifs, lever les verrous de connaissances scientifiques sur le continuum biodiversité édaphique - fonctionnement des sols et des écosystèmes. En vue d’élaborer, d’évaluer et de tester des scénarios de changements de systèmes ou pratiques de gestion agricole ou forestière et d’aménagement du territoire s’inscrivant dans le cadre de la transition agroécologique et leurs effets sur fonctionnement et la santé des sols, il s’agira également de mobiliser les savoirs de différents acteurs et porteurs d’enjeux dans les territoires ciblés (transdisciplinarité). Cette approche permettra de passer à l’échelle, en dépassant les limites des travaux conduits en conditions expérimentales contrôlées sur un nombre limité de combinaisons de conditions pédoclimatiques x usages des sols x systèmes ou pratiques de gestion (Défi 3), tout en développant la visibilité internationale de la France en sciences du sol et en écologie des sols.

A cette fin, quatre groupes de travail (GT), rassemblant les acteurs des PC1 et PC2, des PEPR partenaires, et aussi des parties prenantes, seront organisés et se rencontreront régulièrement tout au long du programme. Ces groupes de travail visent explicitement à créer des liens entre des communautés complémentaires qui n’interagissent pas encore assez, à structurer ces communautés et à mener également un travail prospectif.

GT1 - Développer des recherches multi-taxa

Dans ce GT, les scientifiques travaillant sur une large diversité d’organismes seront invités à échanger sur leur taxa de spécialité. Le premier objectif sera de faire des synthèses de connaissances avec une approche multi-taxa sur les thèmes des PC1 et 2, afin de bien identifier les lacunes de connaissances et de cibler les actions prioritaires à mener dans le cadre du programme. Le second objectif est de développer un protocole de mesure multi-taxa qui permettra de caractériser de manière standardisée ou interopérable le rôle des différents taxa d’une communauté d’organismes du sol, depuis les microorganismes jusqu’aux macro-invertébrés, dans le but de produire des connaissances directement mobilisables pour les modèles de fonctionnement des sols et des écosystèmes. Le troisième objectif sera de construire et d’analyser des bases de données fonctionnelles multi-taxa et de réseaux d’interactions, en visant la capitalisation des données et méthodes d’analyses. Ceci sera réalisé grâce à l’utilisation de standards (eg Open Traits Network, Darwin Core) et des infrastructures durables et ouvertes, de préférence existantes (par exemple DATA TERRA, le PNDB, les archives Software Heritage et les forges).

GT2 - Faire le lien entre approches empiriques et théoriques

Un verrou majeur en écologie des sols est le manque de capacité à mobiliser les mécanismes à des échelles fines pour explorer leurs conséquences au niveau d’échelles d’organisation supérieures des écosystèmes, de la parcelle au territoire. Afin de lever ce verrou, le GT2 sera organisé pour créer des ponts entre les approches empiriques et les approches théoriques. Ici aussi, un effort sera réalisé pour inclure des spécialistes des différents taxa, mais aussi des différentes disciplines des sciences du sol et de l’écologie. Des synthèses seront faites sur la variété des modèles existant pour décrire le fonctionnement des sols et des écosystèmes, en mettant en évidence le déficit d’intégration des organismes du sol et de leurs réseaux d’interaction. Ceci permettra d’une part d’identifier des modèles candidats où il serait pertinent et réalisable de mieux intégrer les organismes du sol et leurs interactions (en lien avec le PC2), et d’autre part d’identifier les paramètres à mesurer (typiquement les traits) et les conditions de leur mesure (en lien avec le PC1) pour qu’ils puissent être intégrables dans ces modèles. Dans cette optique, le PEPR SolsVivants est une opportunité stratégique pour développer des standards de mesure de processus d’interactions et de traits des espèces.

Un effort significatif sera réalisé pour établir une liste de mesures systématiques à conduire pour les “variables essentielles” du fonctionnement du sol et des écosystèmes, telles que les flux entrant et sortant de l’écosystème, l’abondance des principaux groupes fonctionnels, ainsi que les paramètres clé de structure et composition du sol, et des standards méthodologiques associés seront proposés. De telle façon, modélisateurs et empiristes travailleront de concert afin que les données collectées soient directement utilisables pour paramétriser les modèles et confronter leurs résultats. Ceci implique également le développement d’une offre de données ouvertes et interopérables sur la multifonctionnalité des sols, en lien avec les infrastructures existantes, le Pôle National des Données Biodiversité (PNDB) et DATA TERRA, mobilisables par les scientifiques mais aussi les autres porteurs d’enjeux tels que les citoyens, les gestionnaires des écosystèmes et les décisionnaires dans les territoires. L’accessibilité et l’interopérabilité seront les axes importants pour FAIRiser au maximum les données produites. Les modèles développés permettront d’explorer les questions abordées dans les deux PC : l’estimation de la contribution de

certains groupes fonctionnels aux fonctions écosystémiques telles que la décomposition de la matière organique du sol ou le recyclage des nutriments (PC2), les conséquences en cascades de la perte de certains groupes sur de telles fonctions (PC1) et le passage à l'échelle en considérant des modèles plus intégratifs représentant la multifonctionnalité des sols (PC2).

GT 3 - Explorer des scénarios de changements environnementaux

Ce GT qui s'inscrit en partie dans le Défi 3 vise à mobiliser les connaissances acquises dans les PC 1 et 2 afin d'explorer divers scénarios de changements environnementaux découlant des activités anthropiques qui soient pertinents au niveau des territoires-observatoires ciblés dans le programme. Il rassemblera une diversité d'acteurs, scientifiques de SolsVivants et des PEPR partenaires, ainsi que diverses parties prenantes, afin d'intégrer les enjeux et contraintes socio-économiques qui se posent aux échelles des socio-écosystèmes. Dans le cadre du PEPR SolsVivants, deux approches exploratoires seront développées.

Dans la première approche, les modèles de fonctionnement des sols et des écosystèmes seront utilisés pour étudier les mécanismes de réponses du sol et des socio-écosystèmes à divers scénarios d'intensification des contraintes environnementales, tels que l'augmentation des températures ou la modification des régimes de pluie, ou au contraire de réduction des perturbations, par exemple la réduction du labour, ou un agencement réfléchi du paysage. Le but sera d'identifier des dynamiques et mécanismes difficiles à appréhender sans modélisation, comme les boucles de rétroaction du type boucles indirectes antagonistes, ou des bilans des flux au niveau d'un territoire, ainsi que d'explorer les implications des compromis nécessaires dans le cadre d'une désintensification. Le choix des scénarios les plus pertinents à tester *a priori* sera conduit au travers de l'approche multi-acteurs propre à ce GT.

Dans une seconde approche, la faisabilité des différents scénarios, d'un point de vue opérationnel, économique et social sera étudiée *via* un travail prospectif intégrant des compétences en sciences humaines et sociales. Ces résultats seront mis en lien avec les bénéfices et coûts escomptés par la modélisation pour les différents scénarios, en identifiant clairement les compromis. Pour mener à bien ces approches, les réflexions s'appuieront fondamentalement sur les deux territoires-observatoires sélectionnés, afin de développer une démarche ancrée dans des cas réels. Les idées développées sur ces deux territoires d'étude pourront ultérieurement être déployées sur d'autres territoires dans le cadre de programmes complémentaires au PEPR SolsVivants.

GT4 - Créer des synergies entre spécialistes du sol travaillant dans les environnements tempérés et tropicaux

Travailler simultanément en zones tempérées et tropicales permettra de comparer des contextes écologiques et socio-techniques variés, dans des territoires confrontés à différents contextes pédo-climatiques, et de concevoir et évaluer des stratégies de gestion durable adaptées à chacune de ces zones. Cette approche globale offre une compréhension plus complète des interactions biologiques et des fonctions des sols, favorisant ainsi une meilleure préservation des écosystèmes et des services qu'ils fournissent. Les zones tropicales sont souvent riches en diversité biologique et fonctionnelle, mais sont plus vulnérables à une dégradation rapide de leurs sols. Les sols tempérés, bien que moins diversifiés en termes spécifiques, sont généralement plus riches en matière organique et ont des cycles biologiques plus lents mais plus stables. Étudier ces différences est essentiel pour adapter les stratégies de conservation et de gestion durable des sols dans chaque contexte. En choisissant de travailler dans les deux zones, le programme SolsVivants permettra de rapprocher les communautés de scientifiques experts des sols et de partager les approches et les concepts, les efforts méthodologiques, les partenaires et les questions sociétales pour répondre au mieux aux enjeux globaux.

ANNEXE 5 – Composition du Comité de Pilotage du PEPR SolsVivants

■ ■ Le Comité de Pilotage du PTL2 comprend les deux directeurs du PEPR ainsi que neuf scientifiques aux compétences complémentaires :

- *Philippe Hinsinger (INRAE Eco&Sols Montpellier)*
- *Jérôme Mathieu (Sorbonne Université iEES-Paris)*
- *Juliana Almario (CNRS LEM Lyon)*
- *Sébastien Barot (IRD iEES-Paris)*
- *Françoise Binet (CNRS ECOBIO Rennes)*
- *Isabelle Cousin (INRAE Info&Sols Orléans)*
- *Sébastien Fontaine (INRAE UREP Clermont-Ferrand)*
- *Stephan Hättenschwiler (CNRS CEFE Montpellier)*
- *Audrey Niboyet (AgroParisTech iEES-Paris)*
- *Laurent Philippot (INRAE Agroécologie Dijon)*
- *Jean Trap (IRD Eco&Sols Montpellier)*