

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

De la qualité à la santé des sols, quels indicateurs ?

Isabelle COUSIN, INRAe Orléans

Isabelle Cousin, Maylis Desrousseaux, Sophie Leenhardt

Les sols jouent un rôle majeur dans le fonctionnement des écosystèmes continentaux mais ils sont fortement dégradés par les activités humaines. L'Union européenne estime que 60 % des sols de son territoire sont dégradés et qu'il est urgent d'en préserver la qualité, la santé et les fonctions. L'étude IndiQuaSols¹, mandatée à la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE) d'INRAE par le GIS Sol, a ainsi eu pour objectif de proposer un référentiel d'évaluation de la qualité des sols pour la mise en œuvre de politiques publiques.

L'étude a permis le partage d'un langage commun. En effet, la qualité ou la santé des sols sont perçues de façon très différente par les acteurs qui les mobilisent en fonction des préoccupations liées à leur activité. Bien que qualité et santé des sols restent des concepts non stabilisés dans la littérature scientifique, on propose dans cette étude les définitions suivantes : la qualité d'un sol donné correspond à la description de ce qu'il est ou des fonctions qu'il réalise, tandis que la santé d'un sol donné renvoie à un jugement sur ce que le sol vaut ou ce qu'il devrait être. Il convient dès lors de définir les fonctions des sols qu'ils remplissent, et l'étude en a identifié six. Celles-ci sont caractérisées par des indicateurs et, plus largement, par un référentiel d'interprétation qui précise les indicateurs, leurs méthodes de mesure, et des valeurs de référence permettant leur interprétation. Environ une cinquantaine d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques ont été considérés comme pertinents pour suivre la qualité/santé des sols. On a précisé les valeurs de référence de chaque indicateur sur le territoire français, c'est-à-dire ses valeurs d'existence – pour qualifier un ensemble de sols d'un usage ou d'un territoire donné – et ses valeurs seuils et cibles, c'est-à-dire des valeurs critiques qui vont permettre de porter un jugement sur la santé du sol. On a qualifié également le niveau d'opérationnalité de chaque indicateur, ce qui sera présenté dans une autre communication.

Cette liste se veut être un point de départ pour tous les acteurs qui cherchent à qualifier la qualité et/ou la santé des sols.

^[1] Isabelle Cousin (coord.), Maylis Desrousseaux (coord.), Denis Angers, Laurent Augusto, Jean-Sauveur Ay, Adrien Baysse-Lainé, Philippe Branchu, Alain Brauman, Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, Claude Compagnone, Raphaël Gros, Carole Hermon, Catherine Keller, Bertrand Laroche, Germain Meulemans, David Montagne, Guénola Pérès, Nicolas Saby, Emmanuelle Vaudour, Jean Villerd, Cyrille Violle ; Virginie Lelièvre, Sybille de Mareschal ; Marie-Caroline Brichler, Claire Froger, Julie Itey ; Sophie Leenhardt (coord.) (2024). Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Rapport d'étude, INRAE (France). 780 pages - DOI 10.17180/qnpx-x742 .

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

Patrimoine microbiologique du sol

Samuel DEQUIEDT, INRAe Dijon

Cristel Amélie, Barre Pierre, Bargeot Lionel, Chauvin Camille, Cluzeau Daniel, Dequiedt Samuel, Fougeron Agnès, Mina Passi Jean-Bertrand, Villerd Jean, Chemidlin Prévost-Bouré Nicolas, Ranjard Lionel, Maron Pierre-Alain

Le siècle dernier a été marqué par une révolution démographique accompagnée du développement des environnements urbanisés, avec une population mondiale qui vit aujourd'hui pour plus de 50% dans les villes. Ce mouvement s'est traduit par une dégradation de la qualité environnementale des espaces urbains. Dans ce contexte, les politiques d'aménagements s'orientent vers le "retour de la nature en ville" pour améliorer le bien-être des citoyens et la durabilité des systèmes urbains. Ceci requière de progresser dans notre compréhension de l'écologie de l'environnement urbain, avec un enjeu majeur lié à la connaissance et à la gestion du sol, support des activités humaines et d'une biodiversité déterminante pour la multifonctionnalité des systèmes urbains. Bien que les études sur la biodiversité des sols aient connu une croissance exponentielle depuis les années 2000, très peu ont en effet porté sur les sols urbains.

Cette présentation porte sur les travaux réalisés dans le cadre du projet pilote ProDij (Projet d'Investissement d'Avenir TI 2020-2026). Dans ce projet, l'impact sur la qualité écologique du sol de l'usage et des pratiques de gestion des espaces verts de la ville de Dijon a été évalué par le déploiement d'un tableau de bord d'indicateurs (plus de 50 indicateurs permettant de rendre compte des trois piliers physique/chimique/biologique de la qualité écologique du sol) sur 80 sites représentatifs des principaux usages urbains (sites de loisir/sites d'accompagnement de voirie/site d'agriculture urbaine). Les résultats montrent que les sols urbains peuvent accueillir une biodiversité riche et abondante, mais sensible aux pratiques de gestion des espaces verts. Ils contribuent à identifier certaines pratiques vertueuses pour la promotion de la biodiversité du sol. Dans l'ensemble, ces résultats illustrent qu'il pourrait être possible pour les urbanistes d'optimiser la qualité écologique des sols grâce à une utilisation durable des sols urbains et à des pratiques de gestion associées. Un effort important reste encore à fournir pour développer des référentiels d'interprétation propres aux systèmes urbains afin d'améliorer la qualité des diagnostics fournis par les indicateurs existants.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

**Les activités enzymatiques, de nouveaux indicateurs
pour évaluer la santé des sols**

Christian MOUGIN, Plateforme Biochem-Env, UMR ECOSYS, INRAe

Christian Mougin¹, Erell Naslain¹, Françoise Poiroux¹, Pierre Gosseume¹, Thérèse de Caldas¹, Matthieu Valé², Alexandre Wadoux³, Nicolas Saby⁴

¹INRAE, UMR ECOSYS, Plateforme Biochem-Env, 91120 Palaiseau

²Auréo AgroSciences, 45160 Ardon

³INRAE, UMR LISAH, 34060 Montpellier

⁴INRAE, UR Info&Sols, 45075 Orléans

contact-biochemenv@inrae.fr

Les activités enzymatiques des sols sont associées aux fonctions majeures de décomposition de la matière organique, transport, stockage et recyclage des nutriments. Elles sont mesurées depuis des décennies pour évaluer la fertilité des sols ou encore l'impact de contaminations chimiques. La plateforme Biochem-Env a pour objectifs de faire évoluer ces descripteurs biochimiques vers des indicateurs fonctionnels de la santé des sols.

Dans ce cadre, elle a fiabilisé les méthodes de mesure en portant différentes normes internationales. Elle a également adapté ses modes opératoires pour les rendre opérationnels en routine sur des chaînes robotisées de mesure, offrant ainsi la possibilité de traiter un grand nombre d'échantillons. Ces évolutions, associées à des projets nationaux de surveillance des sols (RMQS...) lui permettent de disposer aujourd'hui d'un référentiel de mesures au plan national. Ce référentiel, fort de plus de 70000 valeurs, porte sur une dizaine d'activités enzymatiques pour différentes occupations du sol.

Nous déployons actuellement des démarches de modélisation qui permettent, sur la base des points du RMQS, une cartographie nationale des activités enzymatiques en fonction de plusieurs types de covariables (climatiques, topographiques, pédologiques et occupation du sol). Nous contribuons actuellement, dans le contexte du projet AGRO-ECO SOL, au développement d'outils de diagnostic et de conseil pour une meilleure gestion des sols.

Notre travail bénéficie, au titre de l'utilisation de la plateforme Biochem-Env (DOI 10.15454/HA6V6Y, UMR 1402 ECOSYS, centre INRAE IdF Versailles-Saclay), d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence "ANR-24-INBS-0001" AnaEE France.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

Les vers de terre, indicateurs de santé des sols agricoles et urbains

Daniel CLUZEAU, OPVT-Univ. Rennes, UMR ECOBIO, CNRS

Daniel Cluzeau, Kevin Hoeffner, Guénola Peres, Jennifer Scimia, Diane Fiala, Gaël Guégan, Loris Delourme, Albin Fertil, Jeanne Maréchal & Sarah Guillocheau (*Observatoire des Sciences de l'Environnement de Rennes - OSERennes*) <https://projets.ecobio.univ-rennes.fr/opvt/>

Les vers de terre, également appelés lombriciens, sont des organismes invertébrés du sol connus de tous et sont considérés comme ingénieurs du sol par leurs contribution à diverses fonctions des sols (décomposition et de brassage de la matière organique, agrégation et structuration, infiltration et rétention en eau, stimulation des activités microbienne, ...). Ce sont des bioindicateurs d'effet reconnus qui rendent compte de l'état et des usages des sols. Leurs abondance, richesse et distribution selon différents habitats ainsi que leur contribution à des services écosystémiques, restent à préciser, de la parcelle locale aux territoires associés à différentes échelles (Commune, InterCom/EPCI, Département, Région, Etat, Europe).

En 2010, suite à divers programmes de recherche confirmant l'importance des lombriciens ainsi que l'érosion de leur biodiversité, les **acteurs du développement agricole** et les **institutions nationales & européennes** ont posé des questions sans réponse disponible :

- Comment disposer de valeurs de référence pour les communautés lombriciennes dans les principaux sols agricoles sans disposer de moyens propres très importants ?
- Comment accélérer la prise en compte des savoirs actuels pour intervenir en conseils de gestion avant que le dernier ver de terre soit disparu dans telle ou telle parcelle anthropisée (urbaine, agricole, ...) ?
- Comment développer le référentiel national & européen tout en transférant à tous les utilisateurs de sols, un outil d'autoévaluation des pratiques et leur proposant une aide (pour diagnostiquer et à terme, conseiller) à la gestion de la biodiversité des sols ?

L'Université de Rennes a contribué à apporter des réponses à de telles demandes sociétales en créant l'OPVT (Observatoire Participatif des Vers de Terre) en 2011 qui propose des outils collaboratifs d'évaluation de l'état de la biodiversité lombricienne. Son **objectif principal** est d'acquérir des références nationales en termes d'abondance et richesse taxonomique lombriciennes, pour différents contextes pédoclimatiques et usages des sols. L'OPVT est ouvert à un large public tel que les agriculteurs, les gestionnaires des espaces naturels ou urbains, les jardiniers, les naturalistes, les scolaires, L'OPVT permet d'acquérir de nombreuses données co-construites ou collaboratives ou contributives, à travers sa participation à de nombreux programmes de surveillance, de développement, d'expérimentation et de recherche.

A terme, ces observateurs pourront positionner leurs données par rapport aux références obtenues dans des contextes similaires, et orienter leurs usages pour une meilleure préservation de la biodiversité des sols.

Il existe plusieurs protocoles pour échantillonner les lombriciens qui répondent à différents niveaux d'accessibilité et de précision des résultats souhaités. Depuis 2018, seul le test bêche est promotionné dans tous les habitats, excepté dans le cadre d'une approche pédagogique de sensibilisation de nouveaux acteurs-publics, où là, l'aspect plus ludique du protocole Moutarde est mis à profit !

En privilégiant la démarche collaborative plutôt que simplement contributive, l'OPVT peut réaliser des analyses plus détaillées de la biodiversité lombricienne en produisant des fiches de résultats telles que par exemple :

- (i) une première fiche destinée aux observateurs pour visualiser leurs erreurs d'identification,
- (ii) une deuxième destinée au gestionnaire de la parcelle et observateurs pour rendre compte des résultats de la parcelle en les replaçant dans notre référentiel (diagnostic écologique des communautés lombriciennes)
- (iii) une troisième fiche destinée à servir de support de discussion avec l'équipe de l'OPVT de Rennes pour affiner le diagnostic lors des restitutions organisées en présentiel ou distanciel...

De tels échanges leur permettront, à terme, de mieux positionner leurs données par rapport aux références en contextes similaires et d'orienter leurs pratiques de gestion pour une meilleure préservation de cette biodiversité patrimoniale qui travaille efficacement et discrètement au bénéfice de l'humanité.

De plus, en construisant des diagnostics écologiques détaillés sur l'état des communautés lombriciennes, l'OPVT peut apporter son expertise en collaborant à diverses évaluations multi-indicateurs de la santé des sols.

¹ Programmes nationaux ADEME Bioindicateurs des Sols (2005-2012) & Programmes européens, ENVASSO (2004-2008) & EcoFinders (2010-2014)

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

Carabes et autre macrofaune

Mickaël HEDDE, INRAe Montpellier

Les arthropodes de la macrofaune épigée – notamment les carabes, isopodes, diplopodes et autres groupes facilement capturés par pièges passifs – offrent une fenêtre précieuse sur la structure et la dynamique des communautés fauniques en lien avec l'usage des sols. Leur sensibilité aux perturbations, leur diversité fonctionnelle, et leur accessibilité relative en font des candidats sérieux pour des indicateurs biologiques de la santé des sols.

Dans le cadre de plusieurs programmes de recherche nationaux et territoriaux, nous avons mis en œuvre des protocoles standardisés sur de nombreux sites, et obtenu des jeux de données couvrant des gradients forts de climat, de pratiques agricoles et de naturalité. Nous présenterons les principaux enseignements sur la réponse des communautés de carabidés et de macroarthropodes à ces gradients, ainsi que les implications pour le choix d'indicateurs fonctionnels ou taxonomiques robustes, reproductibles, et interprétables.

Des ponts seront évoqués avec les approches basées sur l'ADNe, non pas comme substituts mais comme outils complémentaires à l'observation directe, en particulier pour des groupes peu identifiables ou cryptiques. L'accent sera mis sur les conditions d'opérationnalisation de ces indicateurs dans les dispositifs de suivi à long terme, en lien avec les enjeux agroécologiques et réglementaires.



Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

Les indicateurs de Mesofaune du sol

Matthieu CHAUVAT, Université de Rouen Normandie

Résumé non parvenu

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

**Utiliser les nématodes pour caractériser
le fonctionnement biologique du sol**

Cécile VILLENAVE, ELISOL environnement

Microscopiques mais omniprésents, les nématodes du sol sont de puissants bioindicateurs pour comprendre le fonctionnement écologique des sols. Présents à raison de plus d'un million d'individus par m², ces vers microscopiques présentent de plus une grande diversité et réagissent de manière fine aux variations de leur environnement, variations qui sont caractérisées scientifiquement. Leur utilisation permet ainsi d'évaluer l'impact des pratiques agricoles ou de gestion des espaces naturels sur la qualité biologique des sols.

Spécialiste de l'écologie des sols, la société **ELISOL environnement** capitalise plus de dix ans d'expérience dans l'analyse des communautés de nématodes, en France comme à l'international. Grâce à sa base de données exclusive **ELIPTO®**, qui regroupe plus de 9 000 analyses sur l'ensemble du territoire français, ELISOL a développé des référentiels d'interprétation robustes et des **scores de qualité du sol (de 0 à 10)** adaptés à divers contextes : agriculture, prairies, forêts, zones urbaines ou sites pollués. Ces scores facilitent la lecture des résultats et offrent un outil concret aux conseillers agricoles, gestionnaires de territoire et acteurs de la transition agroécologique.

Cette présentation propose une **synthèse actualisée des propriétés bioindicatrices des nématodes** et explique comment les mobiliser pour évaluer deux fonctions clés du sol : la **fertilité biologique** et la **biodiversité**. Une étude de cas illustrera l'intérêt de cette méthode, à travers l'évaluation de systèmes agricoles contrastés et la réhabilitation d'un site urbain.

Enfin, ELISOL a récemment développé une **méthode innovante basée sur l'intelligence artificielle**, ouvrant la voie à une utilisation à grande échelle de cet outil de diagnostic de la santé des sols.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

**Bilan opérationnel des indicateurs biologiques de la santé du sol :
étude Indiquasol**

Nicolas CHEMIDLIN PREVOST-BOURE, Institut Agro Dijon

Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, David Montagne

Les préoccupations relatives à la dégradation de la qualité des sols et à ses conséquences environnementales sont de plus en plus fortes. Face à cela, une très large palette d'indicateurs a été développée au cours des dernières décennies pour caractériser et évaluer l'état des sols au travers de leurs composantes physiques, chimiques ou biologiques (Bonilla-Bedoya et al., 2023). Néanmoins, identifier un ensemble d'indicateurs opérationnels reste un enjeu pour évaluer la santé des sols et préserver leur qualité tout en permettant leur utilisation durable.

Dans l'étude IndiQuaSols[1], l'opérationnalité des indicateurs est décomposée en une opérationnalité technique (un indicateur est mobilisable à un niveau de performance donné pour décrire ou évaluer l'état du sol, l'évolution de cet état ou pour fixer des objectifs de qualité et santé du sol) et une opérationnalité d'usage (un indicateur fournit des informations pertinentes pour engager des actions et atteindre le/les objectifs définis). Une méthode d'évaluation de l'opérationnalité des indicateurs a été proposée croisant des approches existantes (Technology Readiness Level, Tier, "Credibility - Saliency - Legitimacy - Feasibility"). Elle s'appuie sur une grille d'analyse critérisée intégrant des notions de crédibilité, de faisabilité, de capacité à informer, de légitimité, de contexte et d'échelle de mise en oeuvre. Cette grille a été appliquée à 65 indicateurs associés à leurs méthodes de mesure respectives, sur la base de travaux et bases de données publiés, des informations relatives à la normalisation des méthodes d'analyse, de rapports d'études et des informations disponibles au niveau des laboratoires.

L'analyse des données obtenues a mis en évidence qu'il est possible de caractériser l'opérationnalité des indicateurs, dont les indicateurs biologiques. Trois profils d'indicateurs ont été mis en évidence suivant un gradient d'opérationnalité croissante: **indicateurs en développement < indicateurs en maturation < indicateurs matures**. Ces **trois profils d'indicateurs** se distinguent par des niveaux croissants de **standardisation des méthodes**; de **taille de bases de données** pour la construction de référentiels d'interprétation pour le bilan/le diagnostic d'état; de sensibilisation et d'**acceptation des acteurs**; et de **diversité de cadres de mise en oeuvre** et d'échelles de pilotage. Dans le cas des indicateurs biologiques testés, ces derniers se positionnent dans les indicateurs matures (microorganismes, nématodes, lombriciens) ou en maturation (activités enzymatiques, mésofaune du sol et microarthropodes).

Il existe donc un ensemble d'indicateurs opérationnels, intégrant des indicateurs biologiques, pour évaluer la santé des sols. A l'avenir, la consolidation des référentiels d'interprétation et l'accélération des actions de dissémination et de transfert (connaissances, outils validés par la recherche) constituent des leviers permettant de renforcer le *monitoring* de la santé des sols à l'aide des indicateurs opérationnels et de compléter la palette de ces derniers en consolidant le caractère opérationnel des indicateurs en maturation ou en développement.

^[1] Isabelle Cousin (coord.), Maylis Desrousseaux (coord.), Denis Angers, Laurent Augusto, Jean-Sauveur Ay, Adrien Baysse-Lainé, Philippe Branchu, Alain Brauman, Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, Claude Compagnone, Raphaël Gros, Carole Hermon, Catherine Keller, Bertrand Laroche, Germain Meulemans, David Montagne, Guénola Pérès, Nicolas Saby, Emmanuelle Vaudour, Jean Villerd, Cyrille Violle ; Virginie Lelièvre, Sybille de Mareschal ; Marie-Caroline Brichler, Claire Froger, Julie Itéy ; Sophie Leenhardt (coord.) (2024). Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Rapport d'étude, INRAE (France). 780 pages - DOI 10.17180/qnpx-x742 .

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

**La métagénomique et la métatranscriptomique pour la microbiologie
du sol : promesses, limites et perspectives**

Téo FOURNIER, [GenoScreen](#)

Les approches omiques portent la promesse d'une vision complète du microbiote des sols, avec un niveau de résolution fonctionnelle et taxonomique sans équivalent. Mais si leur puissance exploratoire est précieuse, elles restent aujourd'hui souvent inadaptées aux exigences du terrain : coût, complexité, accessibilité. Leur véritable rôle ? Servir de matrice de découverte pour développer des bioindicateurs robustes, simples et actionnables via des technologies de routine comme la qPCR. Cette intervention proposera un retour d'expérience terrain et une vision réaliste de la chaîne d'innovation menant des omiques aux bioindicateurs de demain.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

ADNe et metabarcoding pour la faune du sol

Mickaël HEDDE, INRAe Montpellier

Le développement rapide des approches basées sur l'ADN environnemental (ADNe) et le metabarcoding ouvre des perspectives majeures pour l'évaluation de la biodiversité des sols, notamment en ce qui concerne la faune difficile à inventorier par les méthodes classiques. Dans le cadre de plusieurs projets nationaux, nous explorons le potentiel de ces approches pour détecter et suivre les communautés de nématodes, microarthropodes et macrofaune (notamment les vers de terre). Nous présenterons un retour d'expérience sur les aspects techniques, analytiques et opérationnels.

Cette intervention mettra en lumière les apports spécifiques de l'eDNA en complément des inventaires morphologiques (tri manuel, pièges Barber), les avancées méthodologiques en cours, ainsi que les obstacles à surmonter pour une intégration effective de ces indicateurs dans les dispositifs de suivi de la santé des sols. Enfin, nous discuterons des enjeux liés à la standardisation, à la co-construction des protocoles avec les acteurs (agriculteurs, collectivités, filières), et à l'interprétation écologique des signatures ADN dans un contexte de transitions agroécologiques et de réglementation européenne croissante sur les sols.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 1 - État des lieux des indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols validés par la recherche

**Les traits écologiques et fonctionnels des microorganismes
comme indicateurs de fonctionnement du sol**

Sébastien TERRAT, Université de Bourgogne

Le sol est le plus gros réservoir de biodiversité de notre planète. À ce titre, il fournit des services écosystémiques indispensables à la durabilité de notre société. Dans un contexte agricole, environnemental, économique et politique en pleine mutation, la préservation voire la restauration du sol en cas de dégradation représente un enjeu sociétal majeur. Cette préservation nécessite de posséder des indicateurs de la santé du sol à même de pouvoir cibler les différents aspects de sa qualité (physique, chimique et biologique). S'il existe des indicateurs historiques pour évaluer la qualité physique et chimique d'un sol, ceux ciblant la biodiversité sont plus récents. La recherche menée à l'INRAE a ainsi permis de développer des indicateurs de « patrimoine microbiologique » des sols à même de diagnostiquer l'impact des différents usages agricoles et les pratiques associées sur la durabilité des agro-écosystèmes. Ils fournissent un diagnostic de la qualité microbiologique des sols au regard de leurs pratiques et modes de production et permettent ainsi de juger de la durabilité des systèmes de production.

Toutefois, bien que le lien entre la diversité des communautés microbiennes et leurs fonctions a été démontré d'un point de vue expérimental, le développement d'indicateurs opérationnels ciblant directement les fonctions portées par les microorganismes reste un challenge. Récemment, de nouveaux outils bioinformatiques, regroupés sous la terminologie « d'inférence fonctionnelle », ont été mis au point pour aller plus loin dans la caractérisation fonctionnelle des communautés microbiennes. Ces outils, ont pour but de prédire le potentiel des communautés microbiennes en termes de fonctions biologiques en s'appuyant sur les données de composition taxonomique de ces communautés obtenues par méta-barcoding de l'ADN extrait du sol.

Ces nouvelles approches permettent d'obtenir des prédictions sur les fonctions putatives des micro-organismes au niveau des gènes ou des voies métaboliques, en se basant sur les connaissances génomiques d'organismes déjà isolés et/ou cultivés. Ces outils sont prometteurs pour appréhender plus finement la diversité fonctionnelle du microbiote du sol. Par conséquent, ils présentent un fort potentiel pour le développement de nouveaux bio-indicateurs du fonctionnement microbiologique du sol, complémentaires aux bio-indicateurs évaluant son patrimoine microbiologique. Du recul et des validations scientifiques sont cependant encore nécessaires sur ces approches d'inférence fonctionnelle pour éprouver leur robustesse au terrain.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 2 - Application des indicateurs de qualité biologique des sols

Impact des pesticides sur la faune du sol en grande culture, projet Mixtox

Colette BERTRAND, **INRAe**

L'agriculture mondiale est toujours très dépendante des produits phytopharmaceutiques (PPP), dont l'application est à l'origine d'une contamination diffuse de l'environnement ^[1]. Des travaux récents montrent une présence systématique de mélanges de PPP dans les sols agricoles en grandes cultures ^[2]. Mais les « cocktails » de molécules auxquels sont exposés certains organismes du sol restent encore mal connus. Par ailleurs, chaque molécule, même présente à très faible dose, peut contribuer à la toxicité de ces mélanges ^[3]. Les effets cocktails sont souvent additifs, mais peuvent également être synergiques ou antagonistes ^[4]. Cependant, s'il est admis aujourd'hui que les PPP peuvent engendrer des effets indésirables sur la biodiversité du sol ^[1:3], les effets des mélanges de plusieurs substances actives que l'on retrouve dans les sols agricoles restent très mal connus, difficiles à évaluer et à prédire.

L'objectif du projet MixTox (financement ADEME, 2022 - 2026), est de caractériser la contamination de sols en grandes cultures par les PPP, ainsi que l'exposition d'organismes non-cibles du sol (transfert et bioaccumulation de PPP dans des vers de terre, des carabes et des escargots), et d'évaluer les effets indésirables qui en découlent. En combinant des approches de terrain et de laboratoire, l'un des objectifs principaux est d'essayer d'identifier des indicateurs et/ou des bioindicateurs (d'usage, d'exposition ou d'impact) de l'écotoxicité des sols.

Pour ce faire, les propriétés des sols et les mélanges de PPP présents dans les sols de 40 parcelles en grandes cultures (en agriculture conventionnelle et biologique) situées sur le bassin versant d'Orgeval (à 70 km à l'est de Paris) ont été caractérisés au printemps 2022. Une approche par screening large a permis une détection sans a priori et la plus exhaustive possible des pesticides présents dans les échantillons. Sur ces mêmes parcelles, des vers de terre, des carabes et des escargots ont également été échantillonnés, pour identification et quantification des résidus pesticides présents dans les organismes. A titre d'exemple, 51 molécules ont été détectées dans les sols, avec en moyenne 16 ± 6 molécules par parcelle (min=9 ; max=31). Les molécules les plus fréquemment détectées sont le methabenzthiazuron (herbicide), l'imidaclopride et le pirimicarb (insecticides), et l'epoxiconazole, la carbendazime, le fluzilazole et le boscalid (fongicides). Parmi les 40 parcelles échantillonnées in situ, nous avons sélectionné 10 sols avec des propriétés physico-chimiques similaires, mais contrastés en termes de nombre de molécules détectées. Les impacts écotoxicologiques de l'exposition à ces sols contaminés ont été mesurés au laboratoire sur cinq espèces d'invertébrés du sol : une espèce d'enchytraïdes (*Enchytraeus albidus*), deux espèces de vers de terre (*Allolobophora chlorotica* et *Aporrectodea caliginosa*), une espèce de carabes (*Poecilus*

cupreus), et une espèce d'escargots (*Cantareus aspersus*). Après plusieurs semaines d'exposition, nous avons évalué le taux de survie, l'activité ou motricité, le gain ou perte de biomasse, et la reproduction des organismes.

Les données obtenues nous permettront d'estimer les conséquences des modes de gestion sur les risques encourus par des organismes du sol, et de mettre éventuellement en évidence des situations à risque. En croisant les différentes données collectées, les résultats devraient nous permettre également d'identifier des indicateurs et/ou des bioindicateurs d'usage, d'exposition ou d'impact, permettant d'évaluer l'écotoxicité des sols. Nous explorerons l'opérationnalité de ces (bio)indicateurs pour évaluer l'impact des pratiques phytosanitaires sur la santé des sols (via la santé de la macrofaune du sol).

Références

- ^[1] Leenhardt, S. et al, 2022. Rapport de l'expertise scientifique collective INRAE, IFREMER. DOI: 10.17180/0gp2-cd65.
- ^[2] Pelosi, C. et al, 2021. Agric Ecosyst Environ 305, 107167.
- ^[3] Panico, S.C. et al, 2022. Environ Pollut 305, 119290.
- ^[4] Cedergreen, N., 2014. PLoS ONE 9, e96580.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 2 - Application des indicateurs de qualité biologique des sols

**EcoVitiSol, Impact des modes de production et pratiques viticoles
sur la qualité microbiologique des sols**

Cyril ZAPPELINI, INRAe Dijon et Olivier DEVICTOR, Domaine de la Sanglière

Le projet EcoVitiSol® est la première étude menée à grande échelle pour évaluer la qualité physico-chimique et microbiologique des sols de vigne cultivés selon différents modes de production (CV, AB et BD). L'originalité de ce projet est d'aborder cette problématique avec des approches participatives en impliquant directement les viticulteurs au sein d'un territoire défini. Environ 200 viticulteurs ont été impliqués sur les territoires d'Alsace, de Bourgogne du Nord (Côtes de Nuits et Côte de Beaune), et des côtes de Provence. Ils ont mis à disposition leur parcelle sur lesquelles les chercheurs sont venus échantillonner le sol. En parallèle, ils ont décrit précisément leurs pratiques et participé à l'interprétation des résultats obtenus avec les chercheurs. Ce réseau de parcelles a été élaboré avec une répartition équilibrée entre CV, AB et BD au sein du territoire. Les outils modernes utilisés pour évaluer la qualité des sols dans ce projet ont permis de caractériser l'abondance, la diversité et les interactions microbiennes par des approches moléculaires ainsi que la qualité de la matière organique par la technique Rock-Eval® en plus des caractéristiques physico-chimiques classiques (pH, texture, C/N, teneur en Cu...). Tout cela a permis d'appliquer un diagnostic robuste de la qualité des sols sur chaque parcelle du réseau.

Dans ces territoires, l'analyse globale des résultats a montré que moins de 20% des parcelles viticoles analysées étaient dans un mauvais état microbiologique. Il n'y a donc pas d'état d'urgence sur la qualité microbiologique des sols viticoles des territoires étudiés mais plutôt un état de surveillance. Cette conférence présentera plus en détails les résultats obtenus sur chaque territoire et sur les pratiques de gestion des sols et les modes de production. Un viticulteur viendra témoigner de son expérience dans ce projet et des apports techniques et scientifiques qui lui ont permis de modifier et/ou de conforter certains de ces choix techniques.



Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 2 - Application des indicateurs de qualité biologique des sols

Impact de la gestion forestière sur la faune du sol

Camille CHAUVIN, ELISOL environnement et Céline EMBERGER, CEN Occitanie

Résumé non parvenu

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 2 - Application des indicateurs de qualité biologique des sols

ProDij : Caractérisation écologique des sols urbains de Dijon métropole

Pierre-Alain MARON, INRAe Dijon

Cristel Amélie, Barre Pierre, Bargeot Lionel, Chauvin Camille, Cluzeau Daniel, Dequiedt Samuel, Fougeron Agnès, Mina Passi Jean-Bertrand, Villerd Jean, Chemidlin Prévost-Bouré Nicolas, Ranjard Lionel, Maron Pierre-Alain

Le siècle dernier a été marqué par une révolution démographique accompagnée du développement des environnements urbanisés, avec une population mondiale qui vit aujourd'hui pour plus de 50% dans les villes. Ce mouvement s'est traduit par une dégradation de la qualité environnementale des espaces urbains. Dans ce contexte, les politiques d'aménagements s'orientent vers le "retour de la nature en ville" pour améliorer le bien-être des citoyens et la durabilité des systèmes urbains. Ceci requière de progresser dans notre compréhension de l'écologie de l'environnement urbain, avec un enjeu majeur lié à la connaissance et à la gestion du sol, support des activités humaines et d'une biodiversité déterminante pour la multifonctionnalité des systèmes urbains. Bien que les études sur la biodiversité des sols aient connu une croissance exponentielle depuis les années 2000, très peu ont en effet porté sur les sols urbains.

Cette présentation porte sur les travaux réalisés dans le cadre du projet pilote ProDij (Projet d'Investissement d'Avenir TI 2020-2026). Dans ce projet, l'impact sur la qualité écologique du sol de l'usage et des pratiques de gestion des espaces verts de la ville de Dijon a été évalué par le déploiement d'un tableau de bord d'indicateurs (plus de 50 indicateurs permettant de rendre compte des trois piliers physique/chimique/biologique de la qualité écologique du sol) sur 80 sites représentatifs des principaux usages urbains (sites de loisir/sites d'accompagnement de voirie/site d'agriculture urbaine). Les résultats montrent que les sols urbains peuvent accueillir une biodiversité riche et abondante, mais sensible aux pratiques de gestion des espaces verts. Ils contribuent à identifier certaines pratiques vertueuses pour la promotion de la biodiversité du sol. Dans l'ensemble, ces résultats illustrent qu'il pourrait être possible pour les urbanistes d'optimiser la qualité écologique des sols grâce à une utilisation durable des sols urbains et à des pratiques de gestion associées. Un effort important reste encore à fournir pour développer des référentiels d'interprétation propres aux systèmes urbains afin d'améliorer la qualité des diagnostics fournis par les indicateurs existants.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 2 - Application des indicateurs de qualité biologique des sols

Indice de qualité des sols Bruxellois

François HENRY, Bruxelles Environnement

La Région bruxelloise est un territoire fermé, non-extensible et fortement urbanisé de 162 km². La pression sur les sols y est importante. La nécessité se pose de préserver les fonctionnalités des sols de pleine terre dans toutes leurs composantes physiques, chimiques mais surtout biologiques.

Pour ce faire, la Région bruxelloise a planifié et mis en place différentes mesures dans le cadre de la stratégie Good Soil dont l'Indice de qualité des sols bruxellois (IQSB). L'objectif de cet indice est multiple :

- Améliorer nos connaissances des sols de la région dans un contexte urbain fortement hétérogène
- Proposer un outil d'aide à la décision dans le cadre de la planification urbaine
- Améliorer la qualité des sols de la région

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 2 - Application des indicateurs de qualité biologique des sols

**Le diagnostic de la qualité microbiologique des sols au service du
réaménagement durable de la ville sur elle-même**

Battle KARIMI, Novasol Experts

Pour répondre à la directive européenne sur la santé des sols et à l'objectif ZAN, la planification et l'aménagement urbain doivent désormais tenir compte de la qualité des sols. Alors que la plupart des approches proposées focalisent sur la qualité agronomique ou pédologique des sols, nous proposons d'évaluer la qualité écologique des sols incluant les indicateurs physico-chimiques et microbiologiques des sols. Cette approche écologique permet de conclure sur la fertilité des sols mais également sur leur durabilité.

Dans le cadre d'un territoire à très haute densité de construction et d'imperméabilisation des sols (Paris La Défense), l'enjeu est celui de la reconstruction de la ville sur elle-même tout en la renaturant (par ex. par l'aménagement de trames vertes et brunes) et en réutilisant au maximum les sols et matériaux disponibles localement. L'évaluation de la qualité écologique des sols en place ou néo-construits constitue pour l'aménageur un outil d'aide à la décision sur le potentiel réemploi des sols sur site ou hors-site, sur les usages envisageables et les pratiques de gestion les plus adéquats ainsi que sur la durabilité de ces sols et des aménagements paysagers réalisés.

Plusieurs secteurs du territoire aux usages et aux caractéristiques différents ont été investigués : i- l'empreinte d'un futur city stade localisé au cœur d'un Quartier Prioritaire de la ville (QPV), ii- des terrasses de l'université de Nanterre accueillant, entre autres usages, une ferme urbaine, iii- un échangeur d'autoroutes disposant de merlons de stockage de terres et des surfaces végétalisées non exploitées, iv- une nouvelle noue construite avec des objectifs de trame verte, bleue et brune. Pour chaque secteur, une stratégie d'études spécifique a été conçue pour déployer les indicateurs et les outils d'évaluation de la qualité écologique de ces sols. Les résultats ont permis de : i- identifier les sols de qualité écologique satisfaisante et suffisante pour être réutilisés en l'état sur site en assurant la durabilité des aménagements paysagers à venir ; ii- évaluer la possibilité de ré-emploi pour de futurs projets du territoire, de gisements de sol avec un bon potentiel écologique et à ne pas dégrader; iii- de mettre en évidence les pratiques de construction et de gestion des sols appropriées d'une part, et d'autre part inappropriées ayant induit une altération de la qualité des sols ; iv- déterminer les usages à venir les plus appropriés ; v- proposer des actions à mener pour améliorer la qualité de certains sols.

L'ensemble des conclusions et des recommandations formulées sont valorisés par l'aménageur pour optimiser le choix des usages et des aménagements paysagers à venir, pour améliorer la traçabilité des sols et matériaux utilisés, pour faire évoluer ses procédures de mise en place de nouveaux technosols et pour mettre en place une gestion agrandante et non dégradante de la valeur écologique de ces espaces.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 2 - Application des indicateurs de qualité biologique des sols

**Intégrer les bio-indicateurs pour la prise en compte de la santé des sols
dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués :
enjeux et perspectives**

Jennifer HARRIS et Virginie DERYCKE, BRGM

Les bioindicateurs présentent un intérêt croissant pour accompagner la gestion des sites et sols pollués (SSP), en apportant une lecture fonctionnelle de l'état des sols, en lien avec leur biodiversité, leur activité biologique et leur capacité à assurer des fonctions écologiques. Ils ont été récemment valorisés à travers les fiches techniques innovantes, visant à encourager leur appropriation par les acteurs du domaine. Toutefois, leurs diversités et leurs abondances et parfois leur apparente complexité peut freiner leur intégration opérationnelle, malgré l'existence de cadres méthodologiques comme la méthode TRIADE ou l'outil RECORD.

Cette présentation valorise les résultats sur des projets de recherche pour proposer un double cadre: d'une part, un cadre de réflexion à destination des chercheurs développant ces indicateurs ; d'autre part, un cadre structurant pour les utilisateurs potentiels, facilitant une utilisation progressive et proportionnée des bioindicateurs, en cohérence avec les enjeux spécifiques de chaque site.

L'intervention reviendra sur la typologie des indicateurs mobilisables en gestion SSP, en précisant la place des bioindicateurs au sein de cet écosystème d'outils. Elle mettra en lumière les verrous actuels (métrologie, référentiels, acceptabilité réglementaire) et les perspectives d'intégration dans les pratiques, dans un contexte de transition vers une gestion plus durable et fonctionnelle des sols pollués.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

**bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques**

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 2 - Application des indicateurs de qualité biologique des sols

**Les SSP ont-ils nécessairement des sols en mauvaise santé ? Retour
d'expérience de mise en application d'indicateurs (biologiques,
écologiques et chimiques) dans le cadre de la méthode TRIADE**

Benjamin PAUGET, TESORA

B. Pauget¹, N. Manier², M. Noël¹, N. Pucheux (Coord.)²

¹ TESORA, 41 Rue Périer, 92120 Montrouge ; ² INERIS Rue Jacques Taffanel, 60550 Verneuil-en-Halatte ; 3 EFP Nord-Pas-De-Calais, 594 Av. Willy Brandt, 59777 Lille

De nombreuses friches présentent une situation de blocage de reconversion d'usage lorsque la valeur du foncier est dégradée (site orphelin, milieu rural ou de faible activité socio-économique). Il existe pourtant plusieurs autres voies de valorisation à enjeux environnementaux. Ainsi, certaines friches peuvent trouver une seconde vie à travers des projets de revégétalisation favorisant la biodiversité et leur intégration dans le paysage. Le blocage vient alors de la difficulté à se prononcer vis-à-vis du risque qu'elles représentent pour les écosystèmes.

Le projet TRIPODE, mené par L'INERIS et Tesora et soutenu par l'ADEME, a pour objectif de fournir aux acteurs des sites et sols pollués un outil opérationnel d'évaluation du risque pour les écosystèmes (ERE). Un de ses enjeux est d'améliorer la méthode décrite dans la norme ISO 19204 (approche TRIADE de la qualité du sol) et d'assurer son opérationnalité. Ces travaux ont conduit à la production d'un guide technique présentant des recommandations d'aspect pratique ayant trait à la mise en application de la norme et à destination des bureaux d'étude. Le but est d'assurer la démocratisation et la transférabilité de la norme aux acteurs de l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux site pour garantir son opérabilité et son acceptabilité par les maîtres d'ouvrages et l'administration.

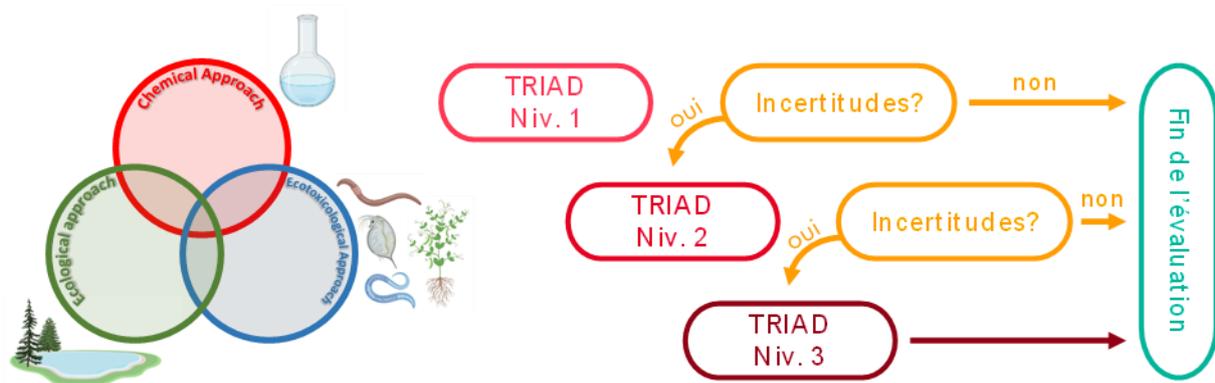


Figure 1 : les trois approches du risque pour les écosystèmes utilisés dans la norme ISO 19204 TRIADE.

La méthodologie TRIADE est une méthodologie d'évaluation des risques pour les écosystèmes décrite dans la norme ISO 19204-2017. C'est une approche complète et structurée qui permet de mettre en évidence un risque environnemental lié à la présence de contaminant dans les sols. Cette procédure permet d'identifier, d'évaluer et de gérer les impacts potentiels sur les écosystèmes terrestres, en prenant en compte les caractéristiques propres au site et les substances chimiques présentes. Cette évaluation repose sur trois piliers (approches) fondamentaux

- L'approche chimique consiste à caractériser et quantifier les contaminants présents dans les sols du site d'étude.
- L'évaluation écotoxicologique des sols est principalement réalisé grâce à des essais en laboratoire pour déterminer la toxicité d'un sol pour une ou plusieurs espèce(s) en caractérisant l'effet toxique.
- L'approche écologique consiste à évaluer la qualité écologique du milieu d'étude. Cette approche va intégrer l'ensemble des voies d'exposition des organismes aux contaminants présents dans les sols.

Une fois ces trois approches réalisées, les données recueillies sont intégrées et confrontées entre elles pour évaluer le niveau de risque pour les écosystèmes (ERE) associé à la contamination des sols. L'objectif de cette confrontation est de travailler dans une optique de faisceau de preuve (Line of Evidence, LoE). Si tous les indicateurs des différentes approches apportent des conclusion similaire, l'évaluation des risques environnementaux est alors conclusive (absence ou présence de risques). Si des divergences notables entre les différentes approches il conviendra alors de poursuivre la démarche en effectuant une itération avec des indicateurs plus complexe.

Le site d'étude du projet est situé à proximité d'une voie de chemin de fer. Aucune ancienne activité n'est identifiée sur le site dans les bases de données BASOL/BASIAS/SIS. La zone d'étude se trouve dans un périmètre naturel protégé (ZNIEFF2 et Natura2000). Les usages actuels sont fixes et aucune modification n'est prévue, le site étant actuellement en zone naturelle. La zone témoin a été sélectionnée dans une optique de rester sur le site d'étude.

La confrontation des 3 LoE, intégrant les réponses des indicateurs du TIER2, permet de calculer une note globale de TRIADE de 0.18 ± 0.12 . Cette fois, le faible score couplé à un écart type faible, permet de conclure sur une absence de risque environnemental sur la parcelle d'étude pour l'usage naturel en cours.



Figure 2 : Notation des risques environnementaux

L'utilisation de la TRIADE et d'outils complémentaires (chimie, écotoxicologie, écologie) a permis de démontrer une absence de risques pour les écosystèmes sur un site présentant pourtant une contamination des sols en Pb (120 mg/kg-1). Ainsi la TRIADE permet d'apporter des éléments de réponse permettant non seulement d'optimiser les opérations de gestion des sites à passifs environnementaux mais également de valider et de sécuriser la compatibilité des risques environnementaux avec les usages actuels et/ou futur des sites.

Les indicateurs biologiques opérationnels de la santé des sols

bilan scientifique et perspectives techniques,
économiques et politiques

25 et 26 juin 2025

Biocitech Paris-Romainville

#Session 2 - Application des indicateurs de qualité biologique des sols

Utilisation conjointe de bioindicateurs et d'indicateurs relevant de la chimie
et de l'écotox pour suivre la trajectoire de réhabilitation d'un site contaminé
(projet GESIPOL DIVA)

Lilian MARCHAND, Suez et Florence BAPTIST, Soltis Environnement

A ce jour, les diagnostics environnementaux dans le domaine des sites et sols pollués (SSP) évaluent principalement la qualité d'un sol par le biais d'analyses physico-chimiques. Sur cette base, des volumes et surfaces conséquents de sol sont déclarés « pollués » et traités comme tel sans que l'on connaisse réellement leur écotoxicité associée, ni leur potentiel écologique. Or la santé d'un sol ne peut pas être correctement évaluée à la seule aune d'analyses physico-chimiques. Ce diagnostic requiert une approche plus holistique, qui englobe la bioindication. C'est ce que propose l'approche TRIADE (NF ISO 19204), basée sur trois « éléments de preuve » : la physico-chimie, l'écotoxicologie et l'écologie. Le projet DIVA (ADEME GESIPOL – 2022/2025) propose un calcul alternatif à l'approche TRIADE classique pour produire un rendu multi-paramétrique illustrant l'état de santé du sol à l'instant T. L'approche TRIADE DIVA permet ainsi à la fois d'estimer un risque pour les écosystèmes mais également de suivre l'évolution de la santé du sol au cours du temps (ex. dans le cadre d'une opération de réhabilitation écologique). Le projet apporte également de la connaissance concernant la place des indicateurs relatifs à l'écologie et à l'agro-pédologie dans les notations TRIADE. Ces travaux permettent d'avoir une vision plus exhaustive de la « qualité » d'un sol et de sa « santé » lors d'une évaluation des risques environnementaux (ERE).