INDICATEURS DE FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DES SOLS AGRICOLES

Fiches pratiques

Recueil de fiches issues des travaux du RMT Bouclage

BOUCLAGE

Recyclage, Fertilisation, Impacts Environnementaux

Réseau Mixte Technologique

Préface

Les sols nous nourrissent, nous habillent, nous fournissent des matériaux et de l'énergie. Au-delà de produire des ressources essentielles à nos vies, ils contribuent à la régulation des cycles de l'eau et des nutriments, dont le carbone et l'azote. Par ailleurs, d'après les dernières estimations, les sols hébergent plus de 50% de la biodiversité mondiale. Les sols sont donc cruciaux à notre survie alors même que plusieurs rapports européens et internationaux alertent depuis des années sur la dégradation des sols. Mieux gérer les sols devient donc capital !

« If you cannot measure it, you cannot manage it » dit le Global Soil Partnership. Effectivement, faire le bon diagnostic sur l'état du sol et être capable de quantifier les progrès liés aux changements de pratiques nécessitent des outils de mesure et des références. Ce recueil regroupe donc les principaux indicateurs renseignant sur le cycle des matières organiques et le fonctionnement biologique des sols, utiles aux agriculteurs pour évaluer leurs pratiques. Il décrit les méthodes de mesures de ces indicateurs, leurs gammes de variation observées, leurs avantages et inconvénients, et il propose aussi des informations essentielles sur les fonctions et les organismes du sol. Il détaille de manière très pratique, comment on réalise et l'on interprète un diagnostic, et précise les éléments relatifs au prélèvement des échantillons : comment prélever, où, et dans quelles conditions.

Ce guide a été écrit par différents spécialistes issus du monde agricole, chercheurs, praticiens utilisateurs et laboratoires prestataires, réunis au sein du RMT Bouclage dans son groupe de travail Bioindicateurs. Il permet d'actualiser et de compléter de précédentes parutions, plus anciennes, coordonnées par l'ADEME ou du Ministère en charge de l'agriculture. Cette mise à jour des indicateurs utilisables pour la caractérisation des sols agricoles bénéficie des dernières connaissances dont le récent état des lieux réalisé dans le cadre de l'étude IndiQuaSols. Ce guide est donc en prise avec l'actualité et présente les derniers savoir-faire pour qui veut gérer durablement son sol et piloter sa fertilité.

Nos sols sont précieux : une prise de conscience est désormais nécessaire, d'autant que les systèmes agroécologiques reposent pour partie sur le bon fonctionnement des sols, constat plus prégnant en climat changeant. Remercions le RMT Bouclage pour ce travail de synthèse et de vulgarisation et souhaitons que la caractérisation plus fréquente des sols devienne la norme, et que la centralisation de ces données puisse nous en apprendre encore plus sur leur état et les modes de gestion les plus durables, en fonction de leur nature.

Antonio Bispo
INRAE, Directeur de l'UR Info&Sols
Animateur du RMT Sols et Territoires

Isabelle Cousin
INRAE, Directrice de recherche, UR Info&Sols
Coordinatrice de l'étude IndiQuaSols

Avant-propos et remerciements

Cet ouvrage a été élaboré par les participants du groupe de travail « Bioindicateurs » du RMT BOUCLAGE. Monté en 2021, ce groupe a pour vocation de mutualiser les connaissances sur la composante biologique de la fertilité du sol, afin de faciliter leur mobilisation dans les diagnostics agronomiques et les démarches de conseil. Il a également pour objectif de faciliter le transfert de savoirs vers les acteurs de l'enseignement. Le groupe de travail « Bioindicateurs » entretient des liens étroits avec le groupe « Fertilité Organique & Biologique des Sols » (FOrBS) du Comité Français d'Études et de Développement de la Fertilisation Raisonnée, (Comifer), pour intégrer dans ses travaux les liens entre pratiques agricoles, matières organiques et composantes biologiques des sols.

Au-delà de la synthèse des indicateurs du fonctionnement biologique des sols qu'il a produite, ce groupe s'inscrit pleinement dans le programme de travail du RMT BOUCLAGE. Il rassemble de nombreux experts issus de la recherche publique et privée, d'instituts techniques, de laboratoires et d'acteurs du développement et contribue à renforcer les dynamiques collectives autour de la gestion durable des sols et de la résilience des systèmes agricoles. De plus, par son approche pratique et collaborative, il offre aux acteurs du conseil, de la formation, de la recherche et du développement des outils partagés pour accompagner efficacement la transition agroécologique.

Le présent recueil, fruit de ce travail collectif, compile un ensemble de fiches pour faciliter l'évaluation du fonctionnement biologique des sols. Nous remercions sincèrement les experts membres du groupe, dont l'engagement et la rigueur ont permis de produire cette synthèse claire et opérationnelle.

Nous exprimons notre gratitude envers Antonio Bispo (INRAE), auteur de la préface, pour sa contribution précieuse qui offre une mise en perspective essentielle de ce travail collectif.

Les expertises mobilisées s'étendent au-delà du groupe de travail, nous tenons donc à remercier Cécile Villenave (ELISOL), Camille Chauvin (ELISOL), Jean Trap (IRD), dont les apports ont enrichi et consolidé la qualité scientifique et pédagogique de ce document.

Enfin nous remercions également l'équipe d'animation du RMT BOUCLAGE : Mathilde Heurtaux (Acta), Sophie Génermont (INRAE), Frédéric Feder (Cirad), Isabelle Trinsoutrot-Gattin (UniLaSalle), Fiona Obriot (LDAR) et Christine Le Souder (Arvalis), pour leur accompagnement et leur soutien constants tout au long de l'élaboration de ce recueil.

Romain Tscheiller (Arvalis) et Wassila Riah-Anglet (UniLaSalle),
animateurs du groupe de travail « Bioindicateurs » et coordinateurs de ce travail

Pour citer ce document :

Romain Tscheiller (coord.), Wassila Riah-Anglet (coord.), Alain Brauman, Jean-Yves Cahurel, Fabienne Delporte, Caroline Dizien, Laure Gontier, Justine Le Net, Najat Nassr, Fiona Obriot, Anne-Sophie Perrin, Christian Revalier, Babacar Thioye et Matthieu Valé (2025). Indicateurs de fonctionnement biologique des sols agricoles - Fiches pratiques - Recueil de fiches issues des travaux du Réseau Mixte Technologique BOUCLAGE.

Imprimé par Unilasalle

Sommaire

Introduction. . . . . p. 7

1 Fonctionnement biologique des sols . . . . . p. 9

1.1 - Définitions . . . . . p. 9

1.2 - Le rôle des organismes du sol . . . . . p. 11

1.3 - Le cycle des matières organiques (MO) . . . . . p. 12

1.4 - Les fonctions associées au sol . . . . . p. 12

2 Diagnostic de l'état biologique. . . . . p. 14

2.1 - Mesures préalables du contexte pédoclimatique . . . . . p. 14

2.2 - Les analyses de terre en France. . . . . p. 14

2.3 - Suivi temporel d'une parcelle . . . . . p. 15

2.4 - Interprétation pour le diagnostic et conseil . . . . . p. 16

3 Mode opératoire de prélèvement, de conditionnement et d'envoi d'échantillons de terre en vue d'une analyse d'indicateurs organo-biologiques. . . . . p. 17

3.1 - Choix de la zone de prélèvement et procédure. . . . . p. 17

3.2 - Prélèvement et mise en sachet : réalisation d'un échantillon composite . . . . . p. 17

3.3 - Conditions de prélèvements et échantillonnage . . . . . p. 18

4 Les fiches . . . . . p. 21

1 Carbone organique du sol. . . . . p. 23

2 Azote total et C/N . . . . . p. 25

3 Fractionnement granulométrique de la matière organique. . . . . p. 27

4 Carbone oxydé au permanganate de potassium (POXC) . . . . . p. 29

5 Carbone microbien (fumigation-extraction). . . . . p. 31

6 Biomasse microbienne moléculaire - ADN total . . . . . p. 33
7 Biomasse bactérienne - ADNr 16S. . . . . p. 35
8 Biomasse fongique - ADNr 18S . . . . . p. 37
9 Taux de mycorhization . . . . . p. 39
10 Minéralisation de l'azote organique . . . . . p. 41
11 Minéralisation du carbone organique . . . . . p. 43
12 Méthode FDA (Fluorescein di-acétate) . . . . . p. 45
13 β-glucosidase (GLU) . . . . . p. 47
14 Glomaline . . . . . p. 49
15 Respiration basale du sol. . . . . p. 51
16 APM . . . . . p. 53
17 ABM. . . . . p. 55
18 Bait lamina. . . . . p. 57
19 Nématodes du sol . . . . . p. 59
20 Vers de terre . . . . . p. 63
21 Diversité bactérienne . . . . . p. 65
22 Diversité fongique . . . . . p. 67

Synthèse des indicateurs. . . . . p. 69

Introduction

Ce recueil a été élaboré dans le cadre du RMT Bouclage, par les membres du Groupe de Travail sur les bioindicateurs, qui réunit les principaux acteurs de la Recherche et du Développement agricole impliqués dans l'étude, le développement ou l'utilisation des bioindicateurs de l'état des sols : recherche publique, recherche privée, instituts techniques, laboratoires et acteurs du développement.

L'objectif du recueil est de recenser les principaux indicateurs de fonctionnement biologique, mobilisables pour le diagnostic, le suivi et le conseil en situation agricole. Grâce à une méthodologie rigoureuse alliant collecte structurée des informations, rédaction collaborative et validation croisée par des experts, ce recueil offre une synthèse claire, fondée sur des données objectives, disponibles et partagées acquises avec des méthodes actuellement disponibles pour les gestionnaires des sols.

Les indicateurs proposés visent en priorité à renseigner certaines des fonctions attendues d'un sol : recyclage des nutriments, transformation du carbone et maintien de la biodiversité. Ces fonctions ne sont pas les seules à être évaluées dans une approche de multifonctionnalité des sols, mais sont considérées aujourd'hui comme les plus informatives pour les gestionnaires des sols en contexte de diagnostic en milieu agricole. Certains indicateurs permettent également d'évaluer la capacité à entretenir la structure du sol, en complément des méthodes d'observation au champ.

Ce panorama est destiné aux acteurs du conseil et du diagnostic de qualité des sols, afin de les aider à sélectionner les indicateurs les plus pertinents à déployer selon leurs problématiques spécifiques

Cette synthèse a été réalisée sous la coordination de Wassila Riah-Anglet et Romain Tscheiller, animateurs du Groupe de travail Bioindicateurs du RMT Bouclage avec l'engagement et la contribution essentiels de nombreux experts issus de différentes institutions.

Principaux auteurs :

Tscheiller Romain[1]et Riah-Anglet Wassila[2] , Brauman Alain[3], Cahurel Jean-Yves[4], Delporte Fabienne[5], Dizien Caroline[6], Gontier Laure[4], Le Net Justine[7], Nassr Najat[8], Obriot Fiona[9], Perrin Anne-Sophie[10], Revalier Christian[11], Thioye Babacar[2], Valé Matthieu[7]

1 - Arvalis
2 - UniLaSalle-unité Aghyle
3 - Institut de Recherche pour le Développement
4 - Institut Français de la Vigne et du Vin
5 - Centre de Recherche Agronomique Wallonie
6 - Agrosolutions
7 - AUREA AgroSciences
8 - RITTMO
9 - LDAR
10 - Terres Inovia
11 - Chambre d'Agriculture du Loiret

En souligné : organisme réalisant des analyses

1
Fonctionnement biologique des sols

Un rapport d'étude scientifique complet a été publié en 2024, approfondissant les notions de qualité des sols et faisant état de manière plus exhaustive des indicateurs utilisables à grande échelle. Dénommé ci-dessous rapport IndiQuaSols, ce recueil y fait référence de nombreuses fois.

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 .
https://college-de-france.hal.science/hal-04934694/

1.1 Définitions

1.1.1 Qualité, santé, qu'évaluons-nous ?

En situation agricole, il était historiquement prioritaire d'évaluer la fertilité du sol, c'est à dire l'aptitude du sol à produire durablement sous un climat et un système de culture, ou encore ses aptitudes culturales. De nos jours, d'autres termes liés à la caractérisation de l'état du sol sont apparus (qualité, santé, sécurité etc.). Ces termes reflètent une évolution de la vision du sol (voir fig.1) passée en quelques décennies d'une dimension centrée sur le service de production de biomasse (fertilité), à une vision plus complexe d'un système multifonctionnel (qualité) et multi-échelle.

Les définitions des termes scientifiques de qualité et santé des sols sont historiquement proches et liées à la mesure de la capacité d'un type de sol à fonctionner (Karlen et al., 1997 ; Doran et Zeiss, 2000). Cependant ces définitions ont été précisées récemment (Kibblewhite, 2008, Cousin et al., 2024). Le

Figure 1 : terminologie liée à la vision du sol et de sa gestion durable *(adapté de rapport IndiQuaSols Cousin et al., 2024)* ▼

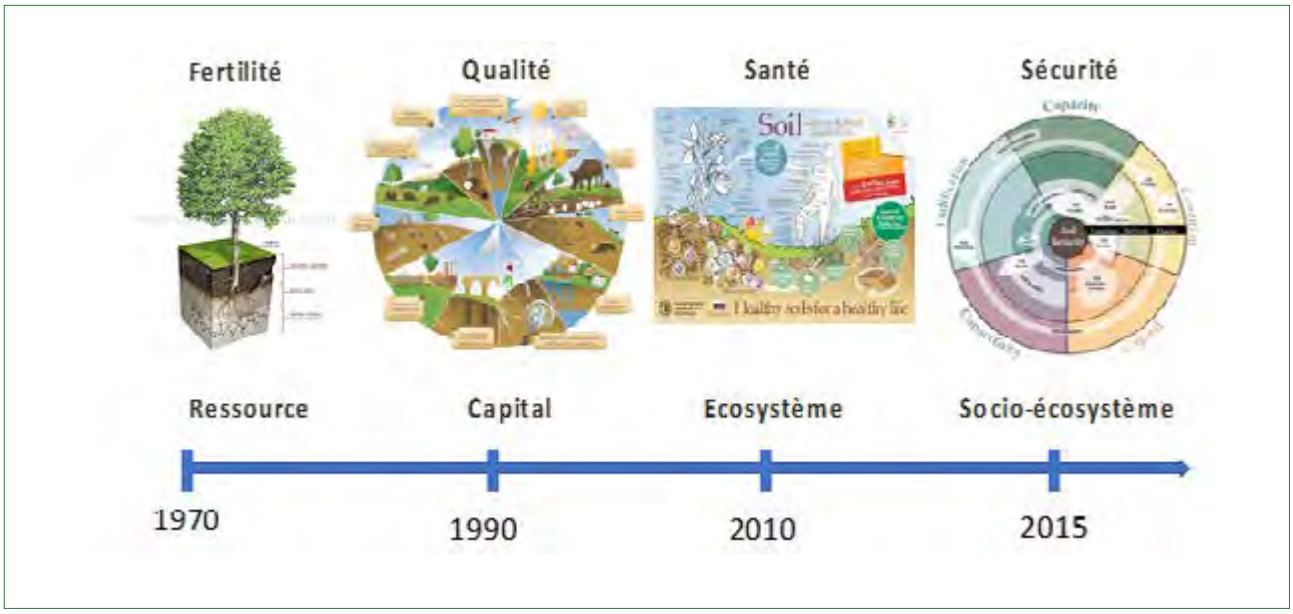
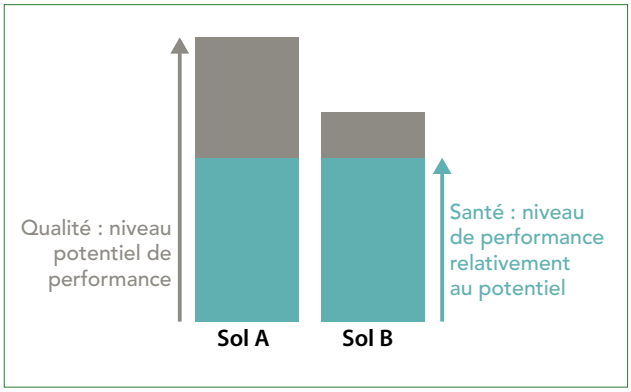


Figure 2 : distinction entre qualité du sol comme potentiel, et santé comme niveau d'atteinte de ce potentiel (adaptée de rapport indiQuaSols Cousin et al., 2024)



Ici, la qualité du sol A et supérieure à celle du sol B mais sa santé est inférieure.

terme qualité est lié au potentiel de performance du sol, en rapport aux propriétés pérennes, alors que le terme santé du sol refléterait la performance réelle du système sol plus lié aux propriétés dynamiques. La santé du sol, telle que définie ici est plus centrée sur l'évaluation du fonctionnement du sol (flux) alors que la qualité des sols est plus centrée sur des données de stock. Les indicateurs opérationnels présentés dans ces fiches sont pour certains des indicateurs d'états (stock), plus liés aux propriétés pérennes (qualité) alors que d'autres sont plus liés aux propriétés dynamiques (santé). Les deux termes sont donc utilisables, mais méritent d'être précisés préalablement avec les interlocuteurs (voir figure 2).

1.1.2 Différentes clefs d'entrées

Le fonctionnement du sol dépend de nombreux paramètres. Certains sont non modifiables à l'échelle de temps humaine : texture (% argile/limons/sables), profondeur, quantité de cailloux, quantité de carbonate de calcium ($CaCO_3$), etc. Ces paramètres exercent une influence forte sur le comportement agronomique et hydrique du sol, ainsi que sur les paramètres biologiques car ils caractérisent l'habitat des organismes du sol. Ils auront toute leur importance dans la démarche de diagnostic, pour l'interprétation des résultats, ainsi que pour le conseil, car les leviers d'actions sur les pratiques agricoles pourront en dépendre.

D'autres paramètres sont modifiables, à court, moyen ou long terme. Il est important de distinguer trois composantes qui jouent un rôle crucial dans le maintien de la qualité/santé du sol et la production agricole durable (voir figure 3) :

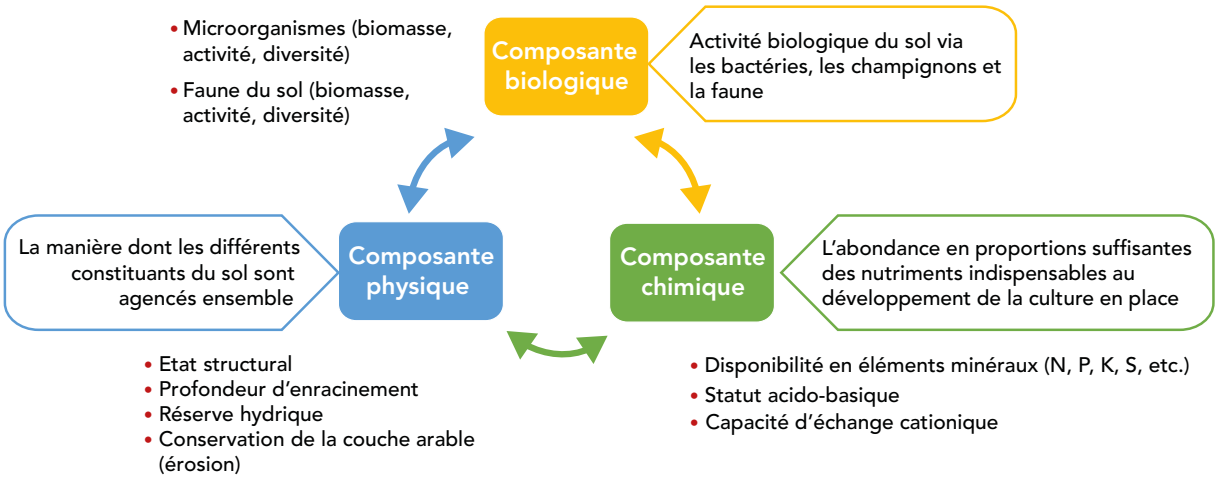
- La composante physique fait référence aux propriétés physiques du sol qui influencent sa capacité à fonctionner. Ces propriétés incluent l'état structural du sol, l'état de compaction et la porosité afin d'assurer une bonne circulation de l'eau et de l'air, de supporter les organismes du sol et de permettre une croissance racinaire optimale.

- La composante chimique concerne la disponibilité des éléments essentiels à l'activité biologique du sol et la croissance des plantes.

- La composante biologique fait référence à l'abondance, l'activité et à la diversité des organismes vivants dans le sol, qui jouent un rôle crucial dans de nombreuses fonctions attendues d'un sol.

Figure 3 : composantes de l'état du sol et leur interdépendance

La capacité d'un sol à assurer ses fonctions résulte de l'interaction entre ces trois composantes physique, chimique et biologique. Un diagnostic complet du sol doit donc évaluer ses trois aspects pour orienter les pratiques agricoles vers une gestion durable et optimale des sols.



1.2 - Le rôle des organismes du sol

Le sol est un écosystème dynamique et complexe, peuplé d'une multitude d'organismes vivants. Les organismes biologiques sont essentiels pour maintenir le fonctionnement et la fertilité des sols agricoles. Cette diversité va des microorganismes (bactéries et champignons), jusqu'à la macrofaune (vers de terre, larves de coléoptères, fourmis) en passant par la mésofaune et la microfaune (nématodes, collemboles, etc.) (voir figure ci-dessous). Ces organismes interagissent en formant une chaîne alimentaire complexe qui joue un rôle crucial dans le recyclage des nutriments et la transformation de la matière organique (MO). Lavelle et al. (2006) les définit en 3 catégories selon leurs tailles et leurs comportements :

• Les ingénieurs chimistes

Les microorganismes, principalement les bactéries et les champignons, décomposent la matière organique en éléments nutritifs assimilables par les plantes, comme l'azote et le phosphore. Ils sont également impliqués dans la dégradation des polluants organiques, contribuant ainsi à la purification du sol.

• Les ingénieurs physiques

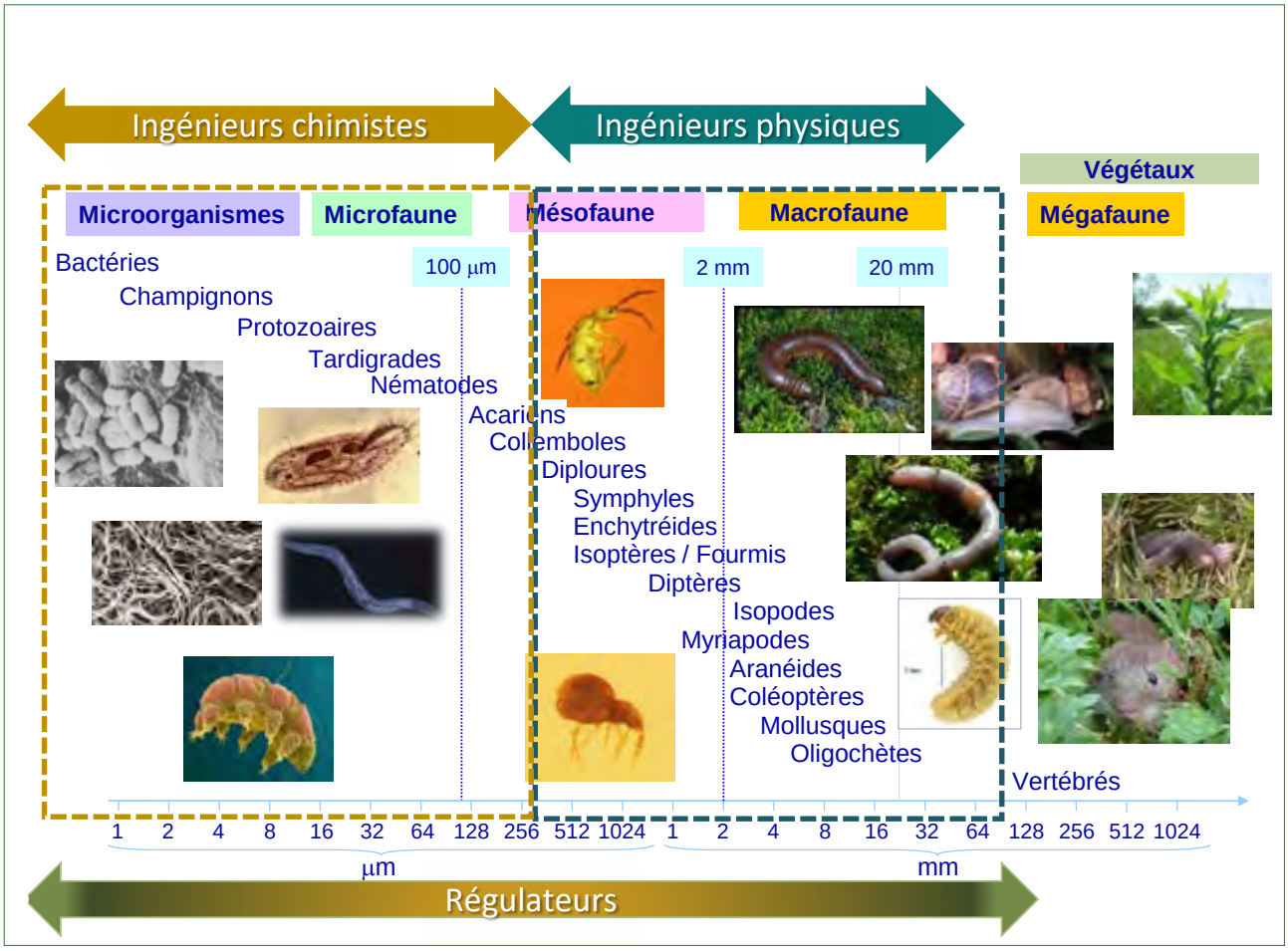
Des organismes comme les vers de terre, les termites et les fourmis modifient la structure du sol. Ils créent des habitats pour d'autres organismes, favorisent l'infiltration de l'eau et la distribution de la matière organique, tout en améliorant l'aération du sol.

Cette classification très simplifiée donne les rôles principaux des organismes du sol, mais chaque groupe peut également contribuer à d'autres fonctions. Par exemple, les vers de terre dégradent également les matières organiques et les microorganismes contribuent aussi à la structuration du sol (voir figure 4).

• Les régulateurs

Les nématodes, les collemboles et les acariens peuvent contrôler les populations de microorganismes, limitant la prolifération des pathogènes et favorisant un équilibre écologique.

Figure 4 : une grande diversité d'organismes vivants dans le sol, de l'infiniment petit au visible, qui contribuent au fonctionnement des sols, Modifié d'après Swift et al. (1979)



1.3 - Le cycle des Matières Organiques (MO)

1.3.1 Définition

La matière organique du sol (MO) regroupe l'ensemble des composés d'origine végétale, animale et microbienne présents dans le sol, à différents stades de décomposition. C'est donc un ensemble complexe et hétérogène (résidus végétaux, racines, faune, microorganismes, matière organique humifiée, etc.), il est donc plus pertinent de parler de matières organiques au pluriel.

1.3.2 Rôle des Matières Organiques dans le sol

Les matières organiques jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des sols. Elles contribuent à de nombreux fonctions et services comme la fertilité (sources de nutriments), le maintien de la structure (agrégation), la rétention d'eau etc.. Leurs quantités et qualités jouent donc un rôle primordial dans le fonctionnement du sol. Certains indicateurs proposés dans ce recueil visent spécifiquement à évaluer la qualité de ces matières organiques.

1.3.3 Différentes qualités des Matières Organiques

Les matières organiques dans le sol subissent une série de transformations (fragmentation, décomposition, minéralisation) grâce à l'activité des organismes vivants. Ces processus conduisent à la formation de matières organiques fraîches (labiles) et de matières organiques stables (humifiées), qui jouent des rôles distincts mais complémentaires dans le fonctionnement du sol.

• Les MO stables

(évolution à l'échelle de plusieurs dizaines à centaines d'années)

Elles contribuent à l'amélioration de la structure du sol, à la stabilité structurale, et améliorent sa capacité à retenir l'eau et les nutriments. Elles jouent également un rôle dans l'atténuation du réchauffement climatique.

• Les MO labiles (plusieurs jours à quelques années)

Plus facilement dégradables, elles constituent une source rapide d'énergie pour les microorganismes du sol, stimulant ainsi les processus de minéralisation et donc la disponibilité d'éléments minéraux.

1.4 - Les fonctions associées au sol

Ce recueil vise en priorité les 3 fonctions ci-dessous, considérant qu'elles seront les plus informatives pour les gestionnaires des sols agricoles.

• Fourniture de nutriments

Les organismes du sol décomposent la matière organique, libérant des éléments minéraux essentiels à la croissance des plantes tels que l'azote et le phosphore.

• Stocker et transformer le Carbone

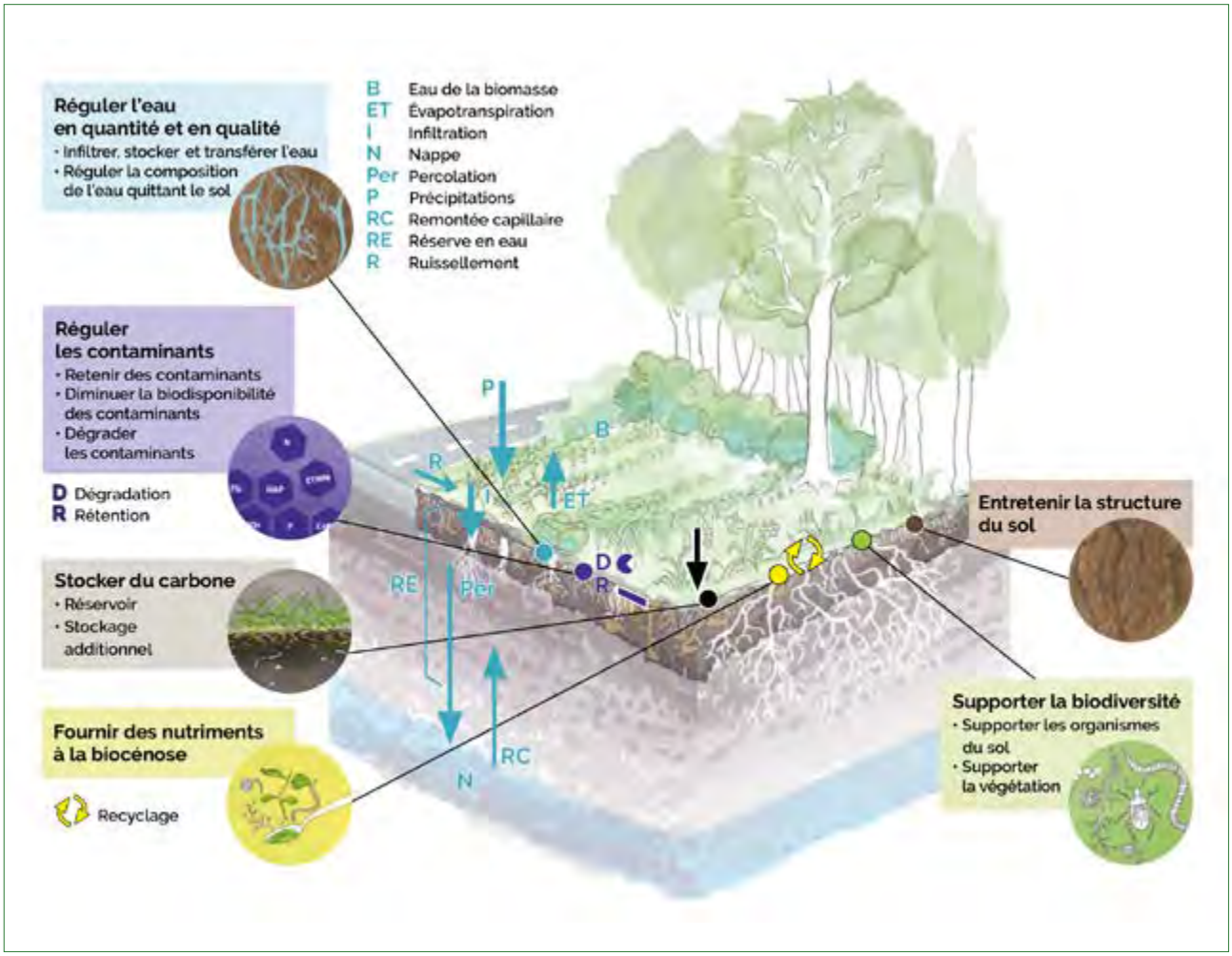
Les organismes du sol jouent un rôle dans la stabilisation du carbone sous forme de matières organiques humifiées, ainsi que dans sa minéralisation, contribuant ainsi à l'équilibre des cycles biogéochimiques.

• Maintien de la biodiversité

Cette fonction correspond à la capacité du sol à maintenir la diversité, l'abondance et l'activité des organismes du sol dans leur ensemble (voir figure 3), ainsi qu'à soutenir l'émergence, la croissance des plantes et la production de biomasse.

D'autres fonctions (6 dans le rapport indiquasols, voir figure 5) sont aujourd'hui à considérer dans une approche de multifonctionnalité des sols comme l'amélioration et l'entretien de la structure du sol, la régulation des contaminants, ainsi que la régulation de l'eau. Certains indicateurs proposés dans ce recueil permettent de qualifier directement ou indirectement d'autres fonctions, comme l'amélioration de la structure du sol.

Figure 5 : les 6 fonctions définies par le rapport Indiquasols (Cousin et al., 2024)



2
Diagnostic de l'état biologique

Pour organiser un suivi ou un diagnostic de la qualité/santé des sols, il est en premier lieu nécessaire de déterminer quelles fonctions on cherche à évaluer. Cette première étape peut guider sur le choix de certains indicateurs. A l'heure actuelle, il n'existe pas un seul indicateur intégratif de l'abondance, activité et diversité des organismes du sol et de la qualité des matières organiques. Il faudra donc faire le choix d'une combinaison d'indicateurs par rapport aux objectifs de chaque étude. Le coût, la logistique, les modalités d'interprétation, peuvent également faire partie des facteurs de décision. Un tableau synthétique peut vous aider à sélectionner les indicateurs les plus adaptés à chaque situation (cf tableau page 70). Certains indicateurs peuvent donner une information similaire et ne seront pas des plus complémentaires (cf tableau page 69).

L'étude préalable du contexte pédoclimatique et de l'historique cultural doit permettre de comprendre les contraintes du sol et du système d'exploitation. En fonction de ce contexte et de la problématique, on sélectionnera les indicateurs les plus pertinents.

2.1 - Mesures préalables du contexte pédoclimatique

La composante biologique étant totalement dépendante des composantes physique et chimique du sol, il sera difficile d'interpréter des paramètres biologiques sans un minimum d'informations préalables sur les autres composantes, ainsi que sur la qualité et quantité de matières organiques.

Si le secteur n'est pas connu, il convient de se renseigner sur le contexte pédologique afin d'identifier les contraintes liées à l'occupation du sol car les valeurs des indicateurs de la qualité/santé des sols varient en fonction de ce contexte. La France bénéficie pour cela de différentes bases de données de grande qualité (géoportail de l'IGN https://www.geoportail.gouv.fr/ ; https://webapps.gissol.fr/geosol/) qui permettent d'appréhender ce contexte pédoclimatique.

Cependant, les bases de données disponibles sont réalisées à une grande échelle (1/250 000 ou 1/50 000) et ne présentent pas une précision suffisante à l'échelle de la parcelle. Il est nécessaire de préciser le contexte sur plusieurs aspects :

1. Les caractéristiques physico-chimiques de la parcelle : analyse de la texture des sols (granulométrie 5 fractions sans décarbonatation), analyse chimique de moins de 5 ans (pH, phophore, potassium ,…)

2. L'historique détaillé des pratiques culturales (rotation, gestion des résidus, couverts d'interculture, fertilisation organique et minérale, type et profondeur de travail du sol)

3. Une observation de l'état structural au moment du prélèvement. Ceci peut se faire selon deux modalités soit (voir encadré ci-dessous) :

> un profil de sol (le plus complet mais le plus cher) qui renseignera sur les contraintes de la parcelle et son contexte géomorphologique (profondeur, structure des horizons, texture, réserve utile potentielle)

> une observation plus rapide de l'état de surface du sol (~30 cm), profil agronomique de surface (test bêche /profil 3D au télescopique)

2.2 - Les analyses de terre en France

En France, de nombreuses méthodes d'analyses de terre font l'objet de normes, permettant une harmonisation des pratiques entre les laboratoires. Ainsi, toutes les méthodes normées ont une garantie de transparence de la méthode et de reproductibilité des résultats, même entre des laboratoires différents.

Pour les analyses chimiques, plusieurs indicateurs font l'objet de comparaisons inter-laboratoires. Les différents laboratoires pratiquant l'analyse se voient confier un même jeu d'échantillons et leurs résultats sont comparés pour vérifier leur cohérence. Ce circuit n'existe pas encore pour les analyses biologiques, à l'exception de certains paramètres (carbone microbien par fumigation, fractionnement granulométrique de la MO, potentiels de minéralisation du carbone et de l'azote) mais la création de normes est déjà une garantie de transparence et de qualité des résultats.

Evaluer le maintien de la structure au champ

Plusieurs méthodes sont couramment utilisées en France :

- **Structure du sol**

  > Profil cultural (Gautronneau&Manichon, 1987)

  > Profil 3D (https://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2025/07/Guide-methodique-du-mini-profil-3D-version-web-6M.pdf)

  > Test bêche méthode ISARA (https://orgprints.org/32099/1/peigne-etal-2016-GuideTest-Beche-ISARA_Lyon.pdf)

  > Test bêche méthode VESS (https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/sol/fichiers_pdf/GEODE_SOLS_VESS_A_Test_b%C3%AAche_Horizon_A_score_chart_FR_2018.pdf)

  > méthode Görbing (https://bit.ly/GOER-BING-D1)

  >test TI (https://www.researchgate.net/publication/394530143_TI-test_A_simple_spade_method_to_encourage_more_farmers_and_advisors_to_assess_soil_structure)

La méthode ISARA s'appuie sur le système de notation historique du profil cultural (Peigné et al., 2019). La méthode VESS a fait l'objet d'un développement d'application mobile, et est considéré comme facile à prendre en main (Batey et al., 2015).

- **Infiltration**

  > Méthode Beerkan

  > Double anneau

- **Stabilité à l'eau**

  > Méthode slake test

  > Méthode Le Bissonnais (en laboratoire)

D'autres méthodes peuvent être employées. Il convient avant tout de pouvoir évaluer l'état structural, la porosité et l'absence d'horizon compacté pour interpréter les résultats d'indicateurs de fonctionnement biologique.

2.3 - Suivi temporel d'une parcelle

Le suivi temporel d'indicateurs dans une parcelle permet de caractériser et de quantifier l'évolution de la qualité du sol d'une parcelle suite à des changements de pratiques agronomiques.

Le compartiment biologique du sol est plus sensible et réactif aux variations de pratiques agricoles que d'autres paramètres tels que le stock de carbone, le statut acido-basique ou encore la disponibilité en éléments minéraux. Toutefois, dans le cadre d'un suivi visant à évaluer l'impact de changement de pratiques culturales, il est peu pertinent de réaliser des mesures d'indicateurs du fonctionnement biologique à moins de 2, voire 3 années d'intervalle, car les variations interannuelles liées au climat (l'effet année) peuvent impacter l'interprétation des résultats. Il est également important de réaliser les prélèvements dans des conditions comparables au sein de la rotation culturale et suffisamment éloignées des périodes d'apport d'amendement. Par exemple, il ne serait pas pertinent de comparer une analyse de sol prélevée avant l'implantation d'une culture de printemps avec une analyse de sol antérieure réalisée sur une culture d'hiver, même si la période de prélèvement est identique. De même, l'état de couverture du sol doit également être semblable : par exemple, ne pas comparer une analyse prélevée en sol nu avec une autre sous couvert d'interculture.

Certaines analyses permettent de détecter précocement les effets d'un changement de pratiques agricoles. Certains indicateurs de qualité/santé peuvent être sensibles à l'échelle saisonnière en fonction du stade phénologique de la plante (degré d'enracinement, respiration du sol) ou annuelle (C labile, cycle des nutriments, activité biologique, infiltration) ou 3 à 5 ans après les premières modifications du fonctionnement du sol (fractionnement MO, biomasse microbienne etc), permettant ainsi d'évaluer rapidement l'impact des actions engagées.

Dans le cadre d'un suivi temporel, il sera conseillé de travailler avec le même laboratoire pour limiter la variabilité dans les résultats et garder le même cadre d'interprétation.

En résumé

Le fonctionnement biologique d'un sol peut varier au cours d'une même campagne agricole, sous l'influence des pratiques culturales et des conditions météorologiques, les conditions de température et d'humidité du sol influençant les paramètres biologiques de façon significative. La plupart des références actuelles ont été acquises entre l'automne et le printemps (d'octobre à mai selon les régions).

Dans le cas d'un suivi, il sera donc recommandé de réaliser une évaluation de l'évolution du sol après 3 à 5 ans, à la même période de l'année, et si possible sur la même culture en place ou interculture.

Selon les objectifs des gestionnaires du sol, la fréquence des analyses biologiques pourra également s'aligner sur celle des analyses physico-chimiques des sols utilisées pour évaluer les besoins en fumure ou amendements, soit une analyse tous les 5 ans pour une surface de 5 à 10 hectares.

2.4 - Interprétation pour le diagnostic et conseil

La plupart des indicateurs de fonctionnement biologique ne disposent pas de référentiel permettant de lier les valeurs obtenues à des fonctions du sol (niveau de production, recyclage des nutriments, amélioration de la structure…). Ce manque de connaissances explique la difficulté de la communauté scientifique et technique à définir des valeurs seuils ou des états souhaitables qui sont attendus par les acteurs du développement pour réaliser un conseil à la suite des analyses.

Par ailleurs, il a été démontré que les valeurs obtenues varient en fonction du contexte pédoclimatique. Tous les déterminants ne sont pas encore identifiés, mais il convient d'ores et déjà d'être vigilant dans l'interprétation d'une valeur absolue obtenue sur une parcelle.

2.4.1 - Méthodes d'interprétation des indicateurs

Pour un indicateur donné, les différentes méthodes d'interprétation reposent sur :

> Le suivi de l'évolution temporelle d'une parcelle

De nombreux indicateurs ont un lien qualitatif avec des processus biologiques du sol. Un suivi de l'évolution d'une même parcelle après plusieurs années peut permettre de caractériser l'évolution de l'état biologique.

> Analyse comparative de pratiques

La mesure d'indicateurs au même moment sur deux ou plusieurs modalités (ou parcelles voisines) dans un même type de sol et climat proche sont comparés entre eux.

> Un référentiel de positionnement

Cela consiste à comparer les valeurs d'une parcelle à celles d'un ensemble d'autres parcelles dans une situation géographique, pédoclimatique ou d'occupation des sols proche. Ce positionnement peut être élaboré en fonction du contexte pédoclimatique et de l'usage des sols, via des modèles prédictifs.

2.4.2 - Méthodes d'agrégation d'indicateurs

L'agrégation vise à combiner plusieurs indicateurs en un seul résultat ou indice, afin de faciliter la lecture et l'interprétation d'une fonction ou d'un ensemble de fonctions (Cousin et al., 2024). Ces méthodes s'appuient sur le principe d'interdépendance des composantes de la qualité. Elles sont développées par expertise et/ou méthodes statistiques. Cependant, ces méthodes ont leurs biais (méthodes d'agrégation pas toujours explicites, masquage d'informations importantes, méthode de pondération à dire d'experts). Aussi les résultats issus de ces méthodes d'agrégation doivent être maniés avec précaution.

Plus c'est mieux ?

S'il semble instinctif de viser une quantité élevée d'organismes vivants ou d'activités pour maximiser les effets bénéfiques, les valeurs optimales par indicateur ne sont pas encore connues. Concrètement, bien qu'il soit désormais possible d'annoncer, par exemple, qu'une quantité de microorganismes d'un sol est faible ou élevée par rapport à des références, l'état des connaissances ne permet pas d'affirmer avec certitude qu'elle est suffisante, insuffisante voire trop élevée. De plus, les valeurs souhaitables seront certainement liées aux attentes de l'agriculteur vis-à-vis de la dynamique de ses sols.

2.5 - Pour en savoir plus

- *Batey, T., Guimarães, R. M., Peigné, J., & Boizard, H. (2015). Assessing structural quality for crop performance and for agronomy (VESS, VSA, SOILpak, Profil cultural, SubVESS). In Visual soil evaluation: Realising potential crop production with minimum environmental impact (pp. 15-30). Wallingford UK: CABI.*
- *Djemiel, C., Terrat, S., Dequiedt, S., Jolivet, C., Maron, P. A., & Ranjard, L. (2024). Atlas français des champignons du sol. BIOTOPE..*
- *Karimi, B., Prevost-Bouré, N. C., Dequiedt, S. S., Terrat, S., & Ranjard, L. (2018). Atlas français des bactéries du sol (p. 191). BIOTOPE.*
- *Cousin I., Desrousseaux M., Leenhardt S., et al. (2024). Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Rapport d'étude, INRAE (France). 780 pages - DOI 10.17180/qnpx-x742 .*
- *Imbert, C., Santorufo, L., Ortega, C., Jolivet, C., Bougon, N., Cheviron, N., ... & Bispo, A. (2021). Le RMQS comme support de suivi de la biodiversité des sols : Les programmes passés, présents et futurs. Étude et Gestion des Sols, 28(1), 193-206. https://univ-rennes.hal.science/hal-03484172/*
- *Perrin, A. S., Tscheiller, R., Riah-Anglet, W., Cusset, E., Valé, M., Barbot, C., ... (2023). Microbioterre: référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des apports de matières organiques au champ. Innovations Agronomiques, 88, 15-30. https://hal.science/hal-04312284/*

3

Mode opératoire de prélèvement, de conditionnement et d'envoi d'échantillons de terre en vue d'une analyse d'indicateurs organo-biologiques

Le mode opératoire de prélèvement de terre pour une analyse organo-biologique est très proche de celui pour une analyse physico-chimique classique.

Cependant, la quantification des organismes ou de leur activité implique pour une partie des indicateurs biologiques des conditions de prélèvement et d'envoi plus strictes.

La différence réside surtout dans la période de prélèvement, le conditionnement et l'envoi car les paramètres biologiques sont sensibles aux conditions de température et d'humidité. Ce prélèvement peut donc être couplé au prélèvement destiné à l'analyse physico-chimique de terre avec quelques précautions (décrites ci-après). Pour cela, il faut s'assurer notamment que la quantité de terre prélevée soit suffisante pour le laboratoire.

3.1 - Choix de la zone de prélèvement et procédure

• Si des analyses ont déjà eu lieu, retourner dans la zone historique de prélèvement de la parcelle.

• Sinon, identifier une zone homogène et représentative de la parcelle, en évitant les tournières, les zones de passage de roues, les zones atypiques ou minoritaires (ex. cuvette, type de sol différent, bordures de bois ou de haies, zones de stockage de fumier…). Se placer au centre de la zone et noter les coordonnées à l'aide du GPS. Si la parcelle est très hétérogène et grande, ne pas hésiter à faire des prélèvements par zones distinctes, d'autant plus, si les types de sols sont différents entre zones.

• Evaluer la proportion de cailloux dans l'horizon superficiel du sol. En fonction du travail du sol, l'estimation visuelle en surface peut être biaisée. Une bêchée peut alors permettre de s'assurer de la charge en éléments grossiers (https://wiki.aurea.eu/index.php/Evaluation_de_la_pierrosit%C3%A9).

Les mesures sur un échantillon de terre sont soumises à une certaine variabilité spatiale, inhérente à l'hétérogénéité de la parcelle. Cette variabilité spatiale est à prendre en compte car les pratiques agroécologiques, notamment celles privilégiant le non-travail du sol ou des associations (agroforesterie, associations culturales, etc.) augmentent l'hétérogénéité spatiale .

Pour s'assurer d'un résultat représentatif de la situation, il est admis qu'un échantillon composite (réalisé à partir de 12 à 15 prises d'essai élémentaires) positionné dans une zone représentative de la parcelle (point géoréférencé) permet d'atténuer la variabilité. Dans l'idéal, il est conseillé de réaliser des répétitions des mesures pour mieux prendre en compte la variabilité spatiale du système.

Dans le cas des cultures pérennes, où le rang et l'inter-rang peuvent être gérés de façon différente, il est notamment important de réaliser le suivi sur les mêmes parties (rang, inter-rang ou rang + inter-rang). La localisation des prélèvements sera déterminée en fonction des objectifs de ce suivi.

3.2 - Prélèvement et mise en sachet : réalisation d'un échantillon composite

Pour un échantillon composite :

• Sur une profondeur déterminée, à l'aide d'une tarière ou d'une bêche, prélever et déposer dans un seau propre et sec au minimum 12 à 15 prises élémentaires. La méthode du cercle est à privilégier en grandes cultures et polyculture-élevage, pour consti-

Figure 6 : schéma de prélèvement parcellaire - exemple méthode du cercle, grandes cultures et polyculture-élevage (source ARVALIS)

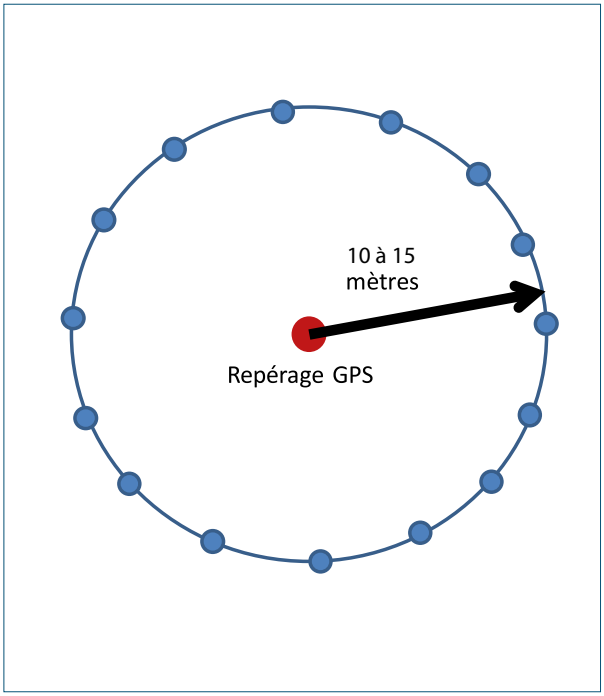
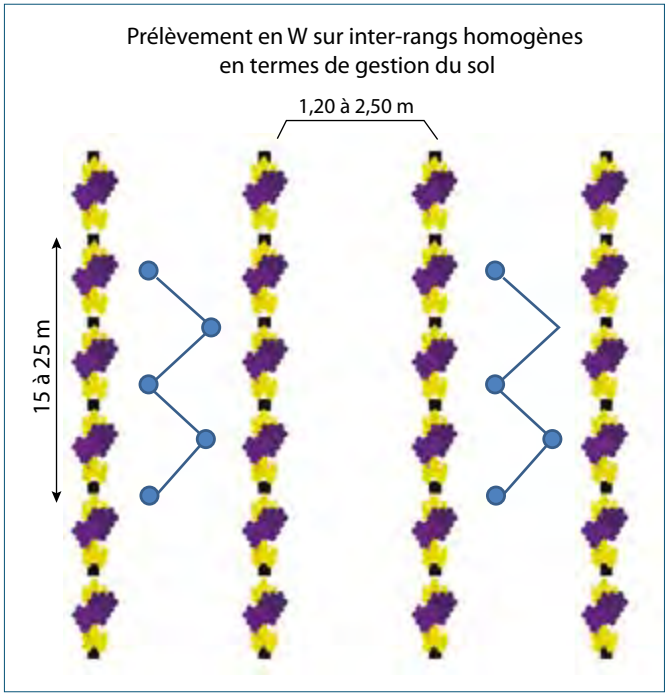


Figure 7 : schéma de prélèvement parcellaire - exemple sols viticoles (source IFV)



tuer un échantillon moyen de la zone sélectionnée (voir figures 6 et 7). En cultures pérennes ou dans des situations particulières, d'autres schémas d'échantillonnage peuvent être utilisés (en croix, ou en transect).

• Mélanger soigneusement le contenu du seau à l'aide du couteau ou d'une truelle, après dissociation manuelle des mottes si nécessaire et retrait des éléments très grossiers (cailloux, débris végétaux).

• Remplir le(s) sachet(s) de prélèvement en veillant à ce que la quantité de terre corresponde aux besoins du laboratoire. Enfin fermer le sachet pour éviter qu'il ne sèche.

3.3 - Conditions de prélèvement et échantillonnage

On distinguera dans le suite du recueil deux types d'analyses :

3.3.1 - Analyse sur sol sec : conditions de prélèvement et d'échantillonnage

Certains indicateurs sont analysés au laboratoire après séchage du sol. La stratégie d'échantillonnage est alors identique à celle d'une analyse de terre classique : conservation de l'échantillon à température ambiante, éloignée des sources de pollution ou d'azote. Le prélèvement doit se faire sur sol ressuyé et impérativement avant un labour, un travail profond ou encore un travail superficiel. Le délai entre le prélèvement et le dernier apport de matières organiques (résidus de cultures, de couvert ou amendements organiques) ou d'azote minéral sur la parcelle doit être supérieur à 2 mois. De même, réaliser le prélèvement avant tout apport d'amendement minéral basique, ou 6 mois après le dernier apport.

Aucune précaution particulière n'est nécessaire pour le transport et la conservation des échantillons.

Profondeur de prélèvement : se renseigner auprès du laboratoire. Pour la plupart, les référentiels existants se basent sur des prélèvements sur la couche 0-20 cm.

D'autres profondeurs de prélèvement peuvent être considérées en fonction de la situation et des objectifs.

N.B. dans le cadre d'un suivi temporel, ou d'une comparaison de parcelles/modalités, il est important que les prélèvements soient tous effectués sur la même profondeur.

Préparation sol sec tamisé et parfois broyé

La préparation des échantillons sur sol sec est réalisée selon la norme NF ISO 11464. La terre est séchée à l'air ou dans une étuve dont la température ne dépasse pas 40°C. Elle peut aussi être lyophilisée. Les échantillons sont ensuite tamisés à 2 mm (puis broyés à 250 µm pour certaines analyses). Ces étapes sont en principe réalisées par les laboratoires réalisant l'analyse.

3.3.2 - Analyse sur sol frais : conditions de prélèvement et échantillonnage

Certains des indicateurs sont analysés au laboratoire sans séchage préalable. Il s'agit généralement de mesures de quantité ou d'activité des organismes du sol. Ces derniers seraient fortement perturbés par un séchage préalable à l'analyse.

Pour ces indicateurs, des précautions supplémentaires sont à prendre afin de ne pas biaiser l'analyse et obtenir des résultats représentatifs du fonctionnement biologique de la parcelle.

- Prélever de préférence entre l'automne et le printemps (octobre à mai) sur un sol proche de la capacité au champ (ni trop sec, ni trop humide) et avec une température moyenne journalière de l'air supérieure à 8 °C et inférieure à 25°C. Proscrire le prélèvement sur sol sec ou gelé.
- Veiller à réaliser le prélèvement :

> Avant tout épandage de produits organiques, d'enfouissement de résidus de culture ou destruction de couvert. Si ce n'est pas possible, il faut un délai minimum de 2 à 3 mois entre le prélèvement et le dernier apport de carbone au sol

> Avant tout apport d'amendement minéral basique, ou 6 mois après le dernier apport

> Impérativement avant un labour, un travail profond ou encore un travail superficiel, ou deux mois après le dernier travail du sol

> Après la valorisation de tout apport d'engrais minéral (pluie supérieure à 15 – 20 mm) et au moins 4 à 5 semaines après le dernier apport

- **Profondeur de prélèvement** : se renseigner auprès du laboratoire. Pour la plupart, les référentiels existants se basent sur des prélèvements sur la couche 0-20 cm.

Gestion de l'échantillon après prélèvement

- Envoyer l'échantillon au plus tôt après son prélèvement.
- Choisir un envoi rapide (24h) ou en main propre, afin que le laboratoire reçoive les échantillons le plus vite possible, sans bloc de froid, idéalement dans des sacs isothermes ou des glacières.
- Prévenir le laboratoire avant envoi pour faire coïncider l'arrivée des échantillons avec une période de prise en charge rapide. Un stockage au réfrigérateur en froid positif est possible pendant quelques jours en général.
- Sauf instructions spécifiques du laboratoire, proscrire le stockage au congélateur, qui peut tuer une partie des microorganismes du sol.

Figure 8 : récapitulatif des étapes à réaliser selon le type d'indicateurs ▶

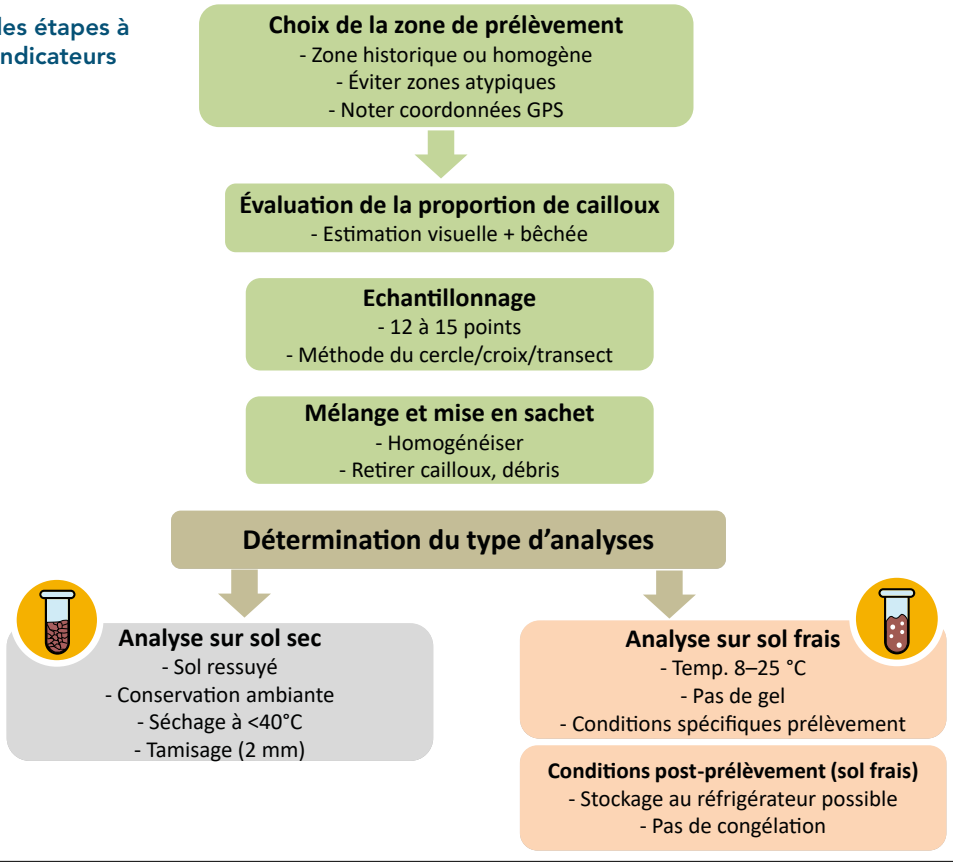


Tableau 1 : exemple de conditions de stockage et d'envoi des échantillons pour analyse organo-biologique

▼

Avant tout envoi d'échantillon, il est recommandé de se renseigner auprès du laboratoire, la qualité de certaines analyses peut être altérée si l'échantillon est stocké plus de 2 jours avant envoi. Pour certaines analyses, les conditions de stockage avant envoi peuvent également différer. Dans tous les cas, le laboratoire effectuant les analyses pourra vous renseigner.

Indicateurs	Etat du sol pour analyse	Température stockage avant envoi	Stockage avant envoi
C org (%)	Sol sec	Pas de restriction	Pas de restriction
N total (%) et C/N	Sol sec	Pas de restriction	Pas de restriction
Fractionnement granulométrique	Sol sec	Pas de restriction	Pas de restriction
POXC	Sol sec	Pas de restriction	Pas de restriction
Minéralisation de l'azote	Sol frais	Réfrigéré (+4 à 5°C)	Jusqu'à 7 jours
Minéralisation du carbone	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours
C microbien (fumigation-extraction)	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours
ADN total	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours
Biomasse bactérienne ADNr 16S	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours
Biomasse fongique ADNr 18S	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours
Fluorescein di-acétate (FDA)	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	24 h max
β-GLUCOSIDASE (GLU)	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	24 h max
Concentration totale de glomaline	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours
Respiration in situ	In situ		
APM	sol sec	Pas de restriction	Jusqu'à 7 jours
ABM	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours
Bait lamina	In situ		
Nématofaune	Sol frais	à conserver entre 8 et 20°C	Jusqu'à 7 jours
Vers de terre	In situ		
Taux de mycorhization des racines	Racines fraîches	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours
Diversité bactérienne	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours
Diversité fongique	Sol frais	Réfrigéré (+4-5°C)	Jusqu'à 7 jours

Sources

- Batey, T., Guimarães, R. M., Peigné, J., & Boizard, H. (2015). Assessing structural quality for crop performance and for agronomy (VESS, VSA, SOILpak, Profil cultural, SubVESS). In Visual soil evaluation: Realising potential crop production with minimum environmental impact (pp. 15-30). Wallingford UK: CABI.

- Karlen, D.L.; Mausbach, M.J.; Doran, J.W.; Cline, R.G.; Harris, R.F.; Schuman, G.E. (1997). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. Soil Science Society of America Journal, 61 (1): 4-10. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x

- Kibblewhite, M.G.; Ritz, K.; Swift, M.J. (2008). Soil health in agricultural systems. Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences, 363 (1492): 685-701. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178

- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.-P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. Eur. J. Soil Biol. 42, S3–S15. doi:10.1016/j.ejsobi.2006.10.002

- Gautronneau, Y., & Manichon, H. (1987). Guide méthodique du profil cultural (p. 71). Groupe d'études d'application et de recherche en agriculture.

- Peigné, J., Cadoux, S., Métais, P., & Vian, J. F. (2019). Des méthodes bêches dérivées de la méthode du profil cultural. Agronomie, Environnement & Sociétés, 9(2), 87-93.

- Swift, M. J., Heal, O. W., Anderson, J. M., & Anderson, J. M. (1979). Decomposition in terrestrial ecosystems (Vol. 5). Univ of California Press.

4
Les fiches

LECTURE DES FICHES

La grande pastille indique la fonction principale du sol que l'indicateur vise à renseigner, tandis que les pastilles plus petites représentent les autres fonctions également renseignées par cet indicateur.

DÉFINITION

Cette rubrique donne des explications générales sur l'indicateur.

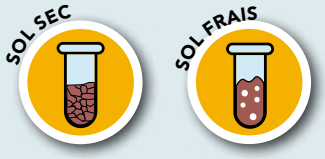
NORME

Lorsqu'elle existe, la norme de mesure est indiquée, à défaut il est précisé la ou les méthode(s) publiée(s) et les plus couramment utilisées.

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Les spécificités de l'échantillonnage et logistique sont indiquées s'il y en a.
Pour la plupart, les exigences se divisent en deux catégories :
- analyse sur sol sec
- analyse sur sol frais

Pour ces deux catégories, la procédure est détaillée dans la partie 3.3.

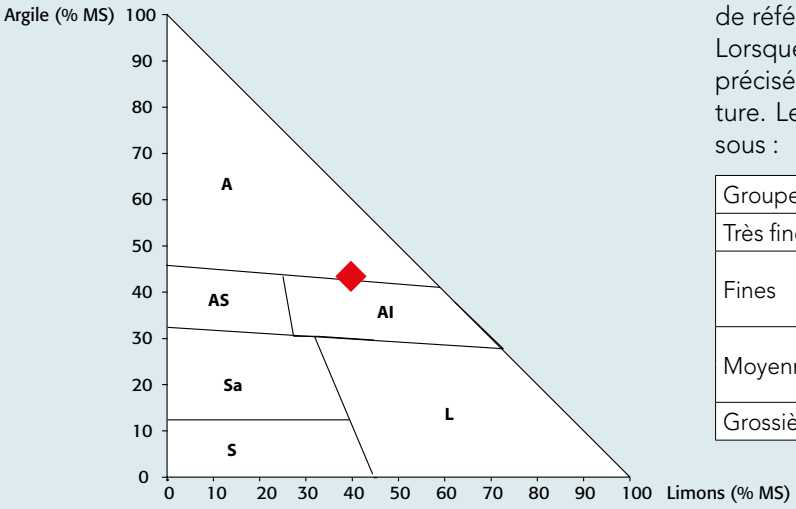


DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

Les principes de la méthode de mesure sont détaillés.

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation du sol	Nb obs.	Min	Max	Médiane



Ici sont présentées les gammes de variations : minimum, maximum et médiane observés sur des jeux de données de référence. La source des références est toujours citée. Lorsque que c'est possible, les gammes de variation sont précisées par mode d'usage des sols, ainsi que par texture. Les classes de texture sont définies comme ci-dessous :

Groupe de classes de texture	Classe de texture	Symboles
Très fines	Argileuse	A
Fines	Argilo-limoneuse	Al
	Argilo-sableuse	As
Moyennes	Limoneuse	L
	Sablo-argileuse	Sa
Grossières	Sableuse	S

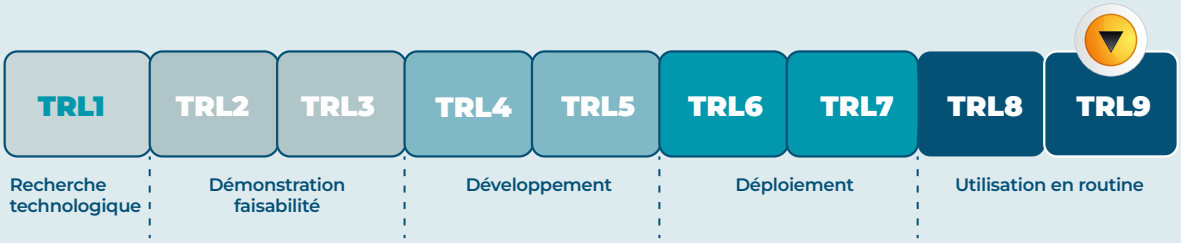
INTERPRÉTATION

Une interprétation générale des résultats est proposée ici.

AVANTAGES / LIMITES

Les principaux avantages et limites de l'indicateur en situation de diagnostic agricole sont cités.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



Donne une idée du coût et du degré d'opérationnalité de l'indicateur en situation de conseil agricole avec une échelle TRL adaptée par les auteurs.

SOURCES

Citation des principales sources de références sur l'indicateur

1 CARBONE ORGANIQUE DU SOL (COS)

DÉFINITION

Le carbone est présent dans les sols principalement sous deux formes :

- le carbone inorganique constituant des minéraux carbonatés (calcaires) du sol,
- le carbone organique qui est le principal constituant des matières organiques du sol.

L'analyse du carbone organique consiste à déterminer la teneur en carbone sans prendre en compte la fraction du carbone « minéral » (carbone inorganique). Elle est utilisée en routine pour estimer la teneur en matière organique totale du sol (MO).

NORME

Deux méthodes d'analyses sont normalisées et font référence en France :

- NF ISO 10694 : Qualité du sol - Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (analyse élémentaire) connue aussi sous le nom de « méthode Dumas ».
- NF ISO 14235 : Qualité du sol - Dosage du carbone organique par oxydation sulfochromique connue sous le nom de « méthode Anne ».

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol sec

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

Préparation de l'échantillon sur sol sec, tamisé, broyé.

Méthode par combustion sèche

Deux techniques différentes sont permises par la norme. La première repose sur la mesure du carbone total suivie de la soustraction par calcul du carbone des carbonates. L'intégralité du carbone présent dans le sol est oxydé en CO_2 par chauffage à plus de 900°C sous flux d'oxygène. La mesure consiste à quantifier le CO_2 dégagé. La teneur en carbone organique est calculée en retirant au carbone total le carbone minéral (le carbone issu des carbonates, dosé par calcimétrie). La seconde méthode consiste à éliminer, préalablement au dosage, les carbonates par une attaque acide de l'échantillon. Dans ce cas la teneur en carbone organique est mesurée directement.

Méthode par oxydation sulfochromique

Détermination par spectrophotométrie de la teneur en carbone organique dans le sol, après oxydation à chaud dans un milieu sulfochromique en présence de bichromate de potassium.

Les deux méthodes fournissent des résultats comparables avec des incertitudes similaires pour les sols non carbonatés (≈10%) et des teneurs en carbone jusqu'à 5-6 %. Pour les sols fortement carbonatés, la méthode par combustion sèche peut se révéler un peu moins pertinente en raison de la variabilité de la mesure en carbonates dans un même échantillon de terre. Pour les sols supérieurs à 5-6 % de carbone organique (sols très organiques), la méthode par oxydation sulfochromique donne des teneurs moins élevées que la méthode par combustion sèche. Il conviendra dans ce cas de bien vérifier la méthode utilisée par le référentiel d'interprétation auquel on se réfère.

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation du sol	Nb obs.	Min	Max	Médiane
C organique Combustion sèche	g C/kg de sol	Grandes cultures	878	2,58	58,20	14,61
		Prairies	521	6,78	145,00	25,15
		Forêts	672	0,59	170,00	28,20
		Vignes et vergers	59	3,41	39,30	9,22

Source : Données du réseau RMQS sur 0-30 cm (Saby et al, 2019)

1 CARBONE ORGANIQUE DU SOL (COS)

INTERPRÉTATION

Le carbone organique permet d'estimer la matière organique du sol via un coefficient multiplicateur conventionnel de 1,72 en général (teneur en MO = 1.72 x teneur en COS). Cependant, la norme NF ISO 14235 précise que ce coefficient peut varier entre 1,7 et 2,5, sans donner de critère de choix. Le rapport teneur en matière organique/teneur en carbone varie avec le degré d'humification. Un coefficient multiplicateur plus proche de 2 semble indiqué dans de nombreuses situations, par exemple pour les horizons bien humifiés ou les sols forestiers (D. Baize, 2017). Les laboratoires utilisent en général un seul coefficient. Le plus simple est de se référer directement à la teneur en carbone organique.

Le carbone organique est à interpréter en fonction des caractéristiques du sol comme la teneur en argile et la teneur en calcaire (en lien avec la cinétique de minéralisation qui diminue avec la teneur en argile et la teneur en calcaire).

Le principal mécanisme de protection de la matière organique est la complexation à la surface des argiles.

AVANTAGES / LIMITES

Analyse peu coûteuse, réalisée en routine par tous les laboratoires.

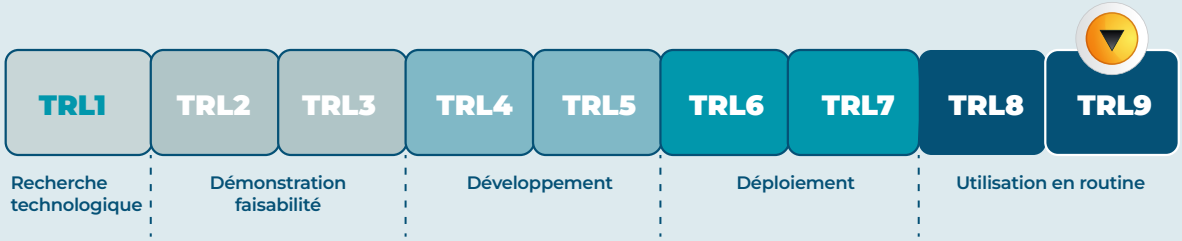
En association avec la densité apparente, la pierrosité et la profondeur de prélèvement, permet d'estimer le stock de carbone organique.

Indicateur fondamental pour qualifier les sols, à la fois en tant qu'indicateur de suivi ou de diagnostic.

Evolution lente dans le temps, il faut à minima 5 ans entre 2 analyses pour commencer à voir une évolution significative.

Approche globale, ne renseigne pas sur la qualité des matières organiques (réfractaire ou labile). Indispensable pour bien interpréter les analyses biologiques, le carbone organique étant une des ressources principales des organismes du sol.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 20 à 30 € si l'analyse du carbone organique est réalisée seule, en tenant compte du coût de la préparation associée
- Moins de 15 € si l'analyse est réalisée dans le cadre d'un menu plus complet
- Utilisable en situation de conseil

SOURCES

Balloy B. et al., (2017). Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols [Disponible en ligne : https://agriculture.gouv.fr/tour-dhorizon-des-indicateurs-relatifs-letat-organique-et-biologique-des-sols]

Baize D., 2017. Du taux de carbone à celui de matières organiques dans les sols. Les mots de l'Agronomie - Histoire et critique sous la direction de P. Morlon, INRAe-ACT

Saby, Nicolas; Bertouy, Benoit; Boulonne, Line; Bispo, Antonio; Ratié, Céline; Jolivet, Claudy, 2019, "Statistiques sommaires issues du RMQS sur les données agronomiques et en éléments traces des sols français de 0 à 50 cm", https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.15454/BNCXYB.

2 AZOTE TOTAL ET C/N

DÉFINITION

L'azote total correspond à la somme de l'azote organique et de l'azote minéral. La forme dominante de l'azote dans les sols naturels et agricoles est la forme organique : entre 0,1 et 0,3 % de la matière sèche (soit, entre 1 et 3 g d'azote organique par kg de terre sèche) sur la couche de surface (0-25 cm), alors que la forme minérale dépasse rarement les 25 mg/kg. La forme minérale correspond à l'azote uréique, ammoniacal et nitrique.

L'azote total du sol est utilisé pour calculer le rapport C/N (rapport entre le carbone organique et l'azote total). Ce rapport permet de juger du degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire de sa capacité à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol.

NORME

NF ISO 13878 : Qualité du sol – Détermination de la teneur totale en azote par combustion sèche (« analyse élémentaire »)

NF ISO 11261 : Qualité du sol - Dosage de l'azote total - Méthode de Kjeldahl modifiée

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol sec

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'échantillon est séché à 38°C, tamisé à 2 mm.

L'azote total du sol est mesuré :

- soit par combustion sèche sur sol broyé à 200-250 µm (méthode Dumas - NF ISO 13878). Cette analyse élémentaire est conjointe de la mesure du C total du sol. L'échantillon y est calciné sous oxygène à 950-1000°C et les gaz produits sont purifiés pour isoler l'azote. Le signal mesuré par un détecteur de conductivité thermique (catharométrie) est alors converti en teneur totale en azote.
- soit par méthode Kjeldahl sur sol tamisé à 2 mm (NF ISO 11261) qui est une minéralisation par H_2SO_4 suivie d'une distillation de NH_3 puis d'un dosage colorimétrique.

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation du sol	Nb obs.	Min	Max	Médiane
N total	g/kg	Grandes cultures	730	0,28	5,09	1,44
		Prairies	571	0,46	12,30	2,31
		Forêts	578	0,04	11,30	1,66
		Vignes et vergers	59	0,37	4,02	0,98
C/N	/	Grandes cultures	817	5,1	21,0	9,8
		Prairies	571	7,8	17,4	10,3
		Forêts	578	8,8	52,7	15,8
		Vignes et vergers	59	5,2	18,3	10,6

Source : Données du réseau RMQS sur 0-20 à 30 cm (azote total, méthode Dumas).

2 AZOTE TOTAL ET C/N

INTERPRÉTATION

La mesure de l'azote total permet d'estimer le potentiel de fourniture du sol en azote minéral, ce qui en fait donc un indicateur sur la fourniture en nutriments du sol. La multiplication du stock d'azote organique du sol (teneur en azote total x quantité de terre fine/ha) par le coefficient de minéralisation K2 (taux de minéralisation annuelle calculé à partir de caractéristiques physico-chimiques et du système de culture) (BOIFFIN et al.,1986) permet d'estimer l'azote minéralisable sur l'année. En outre, c'est un indicateur essentiel pour le paramétrage de modèles agronomiques (Justes et al., 2009, Levavasseur et al., 2020)

Le rapport C/N du sol est un premier indicateur de la qualité et de l'évolution des matières organiques. Hors forêts et cas particuliers, cette proportion se situe souvent aux alentours de 10 (10 fois plus de carbone que d'azote). Un C/N faible (<8) traduit une décomposition rapide des matières organiques, tandis qu'un C/N élevé (>12) une décomposition lente et difficile. Il renseigne donc sur la fourniture en nutriments du sol, ainsi que sur le stock et la transformation du carbone.

AVANTAGES / LIMITES

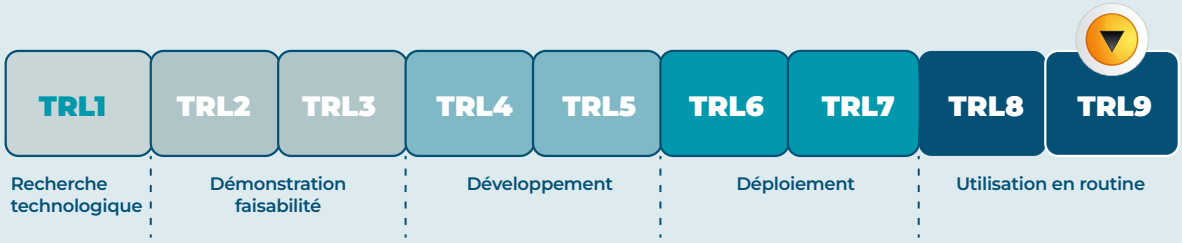
L'analyse est rapide et peu coûteuse. Elle est réalisée sur échantillon séché.

Evolution lente dans le temps, il faut a minima 5 ans entre 2 analyses pour commencer à voir une évolution significative.

Le C/N peut-être perçu comme un indicateur d'état, qui reste général sur les propriétés des matières organiques. Il sera insuffisant pour piloter des pratiques de gestion durables des sols.

Le C/N du sol discrimine uniquement les situations extrêmes (90 % des parcelles en grandes cultures ont un C/N entre 8 et 12). Il devra être complété par d'autres indicateurs, comme le fractionnement de la MO pour une compréhension plus approfondie de la qualité de la matière organique du sol.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- Entre 10 et 20 € en complément d'une analyse de terre (pour l'azote total)
- Utilisable en situation de conseil

SOURCES

Boiffin J., Kzlizagbahi I., et Sebillotte M., 1986. Cropping system and organic status of soils: application of the Henin-Dupuis model.

Saby, Nicolas; Bertouy, Benoit; Boulonne, Line; Bispo, Antonio; Ratié, Céline; Jolivet, Claudy (2019). "Statistiques sommaires issues du RMQS sur les données agronomiques et en éléments traces des sols français de 0 à 50 cm", https://doi.org/10.15454/BNCXYB, Recherche Data Gouv, V5.

Levavasseur F., Mary B., Christensen B. T., Duparque A., Ferchaud F., Kätterer T., ... & Houot S., 2020. The simple AMG model accurately simulates organic carbon storage in soils after repeated application of exogenous organic matter. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 117, 215-229.

Justes E., Mary B. & Nicolardot, B. (2009). Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. Plant and soil, 325(1), 171-185.

3 FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE

DÉFINITION

Le fractionnement granulométrique de la matière organique (MO) distingue celle-ci selon sa taille, en fractions grossières (> 50 µm) et fractions fines (< 50 µm), au sein desquelles sont distribués l'azote et le carbone. La fraction fine correspond à une MO humifiée, c'est-à-dire la partie la plus stable de la MO. Elle est présente en plus grande proportion en climat tempéré.

Les fractions grossières, encore appelées « MO particulaire », correspondent à des débris végétaux en cours de décomposition. Ces fractions constituent une source d'énergie pour les organismes vivants dans le sol. Elles constituent la partie dite "labile" ou active de la MO.

L'analyse peut être réalisée sur deux fractions (<50 µm, 50 à 2000 µm), ou trois fractions (<50 µm, 50 à 200 µm, 200-2000 µm).

NORME

NF X31-516 : Qualité du sol - Fractionnement granulodensimétrique des matières organiques particulaires du sol dans l'eau

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol sec

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

La mesure consiste en un fractionnement physique de la terre fine (dispersion du sol en milieu aqueux, tamisage, sédimentation, centrifugation), une pesée des fractions et une mesure des teneurs en C et N dans les fractions.

GAMME DE VARIATION

	Gamme de variation Mode d'occupation des sol : Grandes cultures et polyculture-elevage
N=183 source Microbioterre, sur 0-20cm	C 0-50 µm - g/kg de terre sèche
	Min: 6 Max: 27 Médiane: 11
	C 0-50 µm - % du carbone organique du sol
	Min: 72 Max: 94 Médiane: 88
	C 50-2000 µm - g/kg de terre sèche
	Min: 0.5 Max: 4.2 Médiane: 1.7
	C 50-2000 µm - % du carbone organique du sol
	Min: 6 Max: 28 Médiane: 12
	N 0-50 µm - g/kg de terre sèche
	Min: 0.5 Max: 2.7 Médiane: 1.2
	N 0-50 µm - %N total
	Min: 80 Max: 97 Médiane: 93
	N 50-2000 µm - g/kg de terre sèche
	Min: 0.0 Max: 0.3 Médiane: 0.1
	N 50-2000 µm - %N total
	Min: 3 Max: 20 Médiane: 7

	Gamme de variation Mode occupation des sols: viticulture
N=42 source projet SolAR, horizon 0-20cm	C 0-50 µm - g/kg de terre sèche
	Min: 5 Max: 26 Médiane: 12
	C 0-50 µm - % du carbone organique du sol
	Min: 49 Max: 85 Médiane: 76
	C 50-2000 µm - g/kg de terre sèche
	Min: 2 Max: 10 Médiane: 4
	C 50-2000 µm - % du carbone organique du sol
	Min: 15 Max: 51 Médiane: 25
	N 0-50 µm - g/kg de terre sèche
	Min: 0.4 Max: 2.5 Médiane: 1.0
	N 0-50 µm - %N total
	Min: 56 Max: 93 Médiane: 81
	N 50-2000 µm - g/kg de terre sèche
	Min: 0.1 Max: 0.7 Médiane: 0.3
	N 50-2000 µm - %N total
	Min: 7 Max: 44 Médiane: 19

3 FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE

INTERPRÉTATION

L'évolution de la part des différentes fractions est connue pour renseigner sur l'évolution du statut organique du sol dans un pas de temps plus court que la teneur en carbone et azote total du sol. Une augmentation de la part de C ou N de la fraction grossière est assimilée à un signe précurseur d'enrichissement du sol en matière organique.

La proportion de fraction fine permet d'identifier le stockage à plus long terme du carbone (durée de vie dans le sol de plusieurs dizaines d'années). Elle correspond à la fraction stable et influence la rétention en eau et la capacité d'échange cationique.

Une valeur élevée du carbone de la fraction < 50 µm indique une stabilisation chimique élevée du C dans les sols (liaisons organo-minérales), en lien avec une fonction de stockage de carbone. Le carbone dans les fractions supérieures à 50 µm, facilement disponible pour les organismes du sol, est lié à la minéralisation de la MO et à la macro-agrégation.

Une valeur élevée de l'azote dans les fractions > 50 µm semble être favorable à la fourniture d'azote pour les cultures.

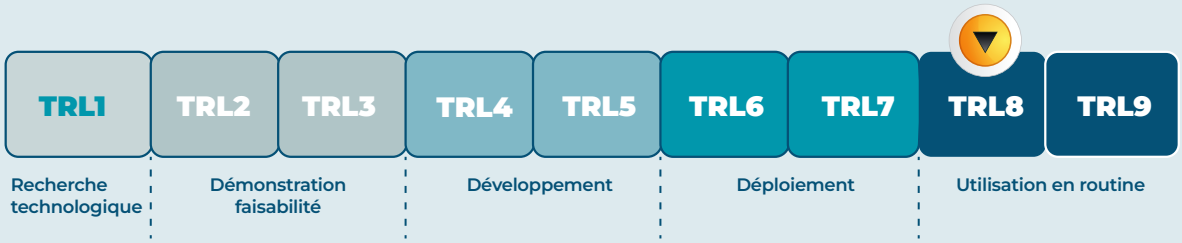
AVANTAGES / LIMITES

Les fractions grossières (matière organique particulaire) répondent rapidement à des changements de pratique (4 à 5 ans).

Souplesse dans les périodes de prélèvements et la conservation des échantillons (analyse sur sol sec).

Une des limites est son coût car ces indicateurs multiplient le nombre d'analyses, et donc les frais de la prestation. Le lien entre les fractions et la dynamique du carbone reste à préciser.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 80 à 120 €
- Utilisable en situation de conseil

SOURCES

Balloy B. et al., (2017). Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols [Disponible en ligne : https://agriculture.gouv.fr/tour-dhorizon-des-indicateurs-relatifs-letat-organique-et-biologique-des-sols].

Deschamps T. et al. (2022). Guide d'interprétation à l'analyse des bioindicateurs. [En ligne : https://www.arvalis.fr/infos-techniques/douze-indicateurs-pour-evaluer-la-fertilite-biologique-du-sol]

4 CARBONE OXYDÉ AU PERMANGANATE DE POTASSIUM (POXC)

DÉFINITION

Le carbone oxydé au permanganate de potassium, parfois appelé carbone actif ou labile, représente une fraction peu stable du carbone. Elle est rapidement dégradable (quelques jours à quelques mois) et constitue une source de carbone oxydable : fraction d'énergie pour les organismes vivants dans le sol.

NORME

Pas de norme à l'heure actuelle.

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol sec

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

Il s'agit d'une mesure par oxydation douce à froid de la matière organique du sol via un réactif, le permanganate de potassium ($KMnO_4$).

Méthode adaptée de Weil et al., (2003) et Culman et al., (2012). Extraction de terre séchée tamisée à 2 mm avec $KMnO_4$ 0.02 M (ratio 1/8 m/v), dosage en spectrophotométrie UV..

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : Culture (n = 183 obs.) Source Microbioterre, horizon 0-20cm		
		Min	Max	Médiane
Carbone oxydé au $KMnO_4$	mg C/kg de sol	390	1414	715
	Unité de mesure	**Mode d'occupation des sols : Vigne (n = 32 obs.) Source : projet OAD MO, horizon 0-20cm**		
	mg C/kg de sol	325	1223	759
	% du Corg total	4,6	7,9	6,6

Climat : tempéré (France métropolitaine)

Texture : toute texture (peu de référence en texture très grossière)

Situation agronomique : Grandes cultures et polycultures élevage, vigne

INTERPRÉTATION

Une valeur élevée va se traduire par une stabilité structurale et une circulation de l'eau et de l'air potentiellement élevées. La minéralisation de la matière organique sera alors également élevée. Cet indicateur peut être combiné avec des mesures de respiration in situ/potentiel de minéralisation.

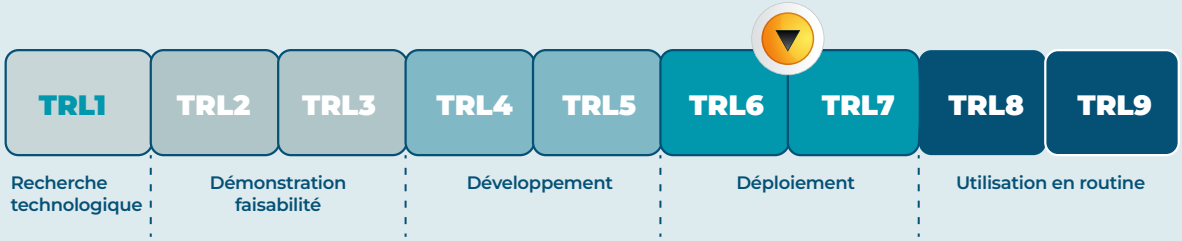
4 CARBONE OXYDE AU PERMANGANATE DE POTASSIUM (POXC)

AVANTAGES / LIMITES

Analyse peu coûteuse, réalisable sur échantillon sec.
Sensible aux pratiques agricoles.

Mesure paraissant moins pertinente dans des milieux aux entrées de carbone conséquentes dans le système (ex. système avec effluents d'élevage).
Interrogation scientifique actuelle sur le type de carbone ciblé par la méthode.
Le protocole de mesure peut différer entre les laboratoires. En cas de suivi, veiller à utiliser la même technique.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 30 à 60 €

SOURCES

Balloy B. et al., (2017). Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols [Disponible en ligne : https://agriculture.gouv.fr/tour-dhorizon-des-indicateurs-relatifs-letat-organique-et-biologique-des-sols].

Cusset, E., Bennegadi-Laurent, N., Recous, S., Bernard, P. Y., Perrin, A. S., Tscheiller, R., ... & Riah-Anglet, W. (2024). Which soil microbial indicators should be included in routine laboratory tests to support the transition to sustainable management of arable farming systems? A meta-analysis. Ecological Indicators, 167, 112706.

Culman, S. W., Snapp, S. S., Freeman, M. A., Schipanski, M. E., Beniston, J., Lal, R., ... & Wander, M. M. (2012). Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. Soil Science Society of America Journal, 76(2), 494-504.

Deschamps T. et al. (2022). Guide d'interprétation à l'analyse des bioindicateurs. [En ligne : https://www.arvalis.fr/infos-techniques/douze-indicateurs-pour-evaluer-la-fertilite-biologique-du-sol]

Weil, R. R., Islam, K. R., Stine, M. A., Gruver, J. B., & Samson-Liebig, S. E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. American Journal of Alternative Agriculture, 18(1), 3-17.

Projet OAD MO (2017-2019), financé par FranceAgrimer et piloté par l'IFV [Résultats non publiés]

5 CARBONE MICROBIEN (FUMIGATION-EXTRACTION)

DÉFINITION

Le carbone microbien est le carbone contenu dans les microorganismes vivants du sol. On parle également de Biomasse microbienne ou de Matière organique vivante (MOV). C'est un indicateur de l'abondance de microorganismes (bactéries et champignons) dans le sol.

Les résultats sont exprimés d'une part en valeurs absolues (MOV en mg de carbone organique/kg de terre sèche), d'autre part en pourcentage du carbone organique total du sol (MOV en % de Corg).

NORME

La méthode de mesure est la méthode de fumigation-extraction au chloroforme (Jenkinson & Powlson, 1976 ; Chaussod et al., 1988 ; Wu et al. 1990).

NF EN ISO 14240-2 : Qualité du sol - Détermination de la biomasse microbienne du sol - Partie 2 : méthode par fumigation-extraction.

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

La méthode consiste à doser le carbone provenant de la lyse cellulaire des microorganismes par fumigation au chloroforme. Le résultat correspond à la différence de teneur en carbone entre un échantillon fumigé et non fumigé. Cette différence de carbone est directement proportionnelle à la quantité de microorganismes tués par le chloroforme.

GAMME DE VARIATION

Situation / source	Unité de mesure	Min	Max	Médiane
Sol viticole / IFV-Sicarex Beaujolais, 2021 N=61 profondeur 0-20 cm	mg C/kg de terre	24	540	81
	% du C total	0,4	7,2	1,4
Sol Grandes culture et polyculture-élevage France / Microbioterre N=183 profondeur 0-20 cm	mg C/kg de terre	114	690	309
	% du C total	0,9	4,8	2,3
BDD AUREA (grandes cultures, viticulture, espaces verts) N = 2 200 profondeur 0-20/25 cm	mg C/kg de terre	55	1200	245
	% du C total	0,6	4,6	1,9

INTERPRÉTATION

Plus la teneur en carbone microbien est élevée, plus la quantité de microorganismes est importante. Cet indicateur est à interpréter en fonction du type de sol (par exemple texture) car ce dernier influe fortement sur le niveau mesuré. Il existe une corrélation positive entre biomasse microbienne et minéralisation de la MO. Un lien positif avec la stabilité structurale a déjà été observé.

La biomasse microbienne est un indicateur sensible et précoce d'une modification du statut organique du sol. Les valeurs exprimées en % du Corg permettent d'approcher l'évolution des quantités de microorganismes indépendamment de l'évolution des teneurs en carbone.

5 CARBONE MICROBIEN (FUMIGATION-EXTRACTION)

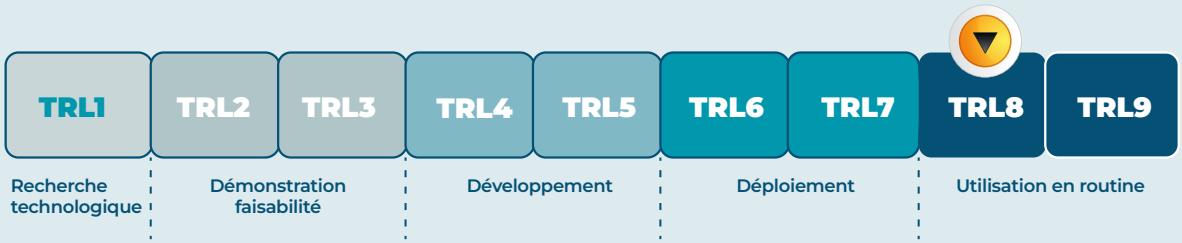
AVANTAGES / LIMITES

Indicateur de quantité de microorganismes assez mature

A réaliser sur échantillon de sol frais

Cet indicateur est à interpréter en fonction de certains paramètres physico-chimiques du sol, notamment texture, pH et teneur en carbone organique.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 60-80 €
- Utilisable en situation de conseil

SOURCES

Chaussod R, Houot S (1993). La biomasse microbienne des sols : perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols. 5e Forum de la Fertilisation Raisonnée, Blois, 16-18 novembre 1993, pp. 17-26.

Chaussod R, Houot S, Guiraud G, et al. (1988). Size and turnover of the microbial biomass in agricultural soils: laboratory and field measurements.

Deschamps T, et al. (2022). Guide d'interprétation à l'analyse des bioindicateurs. En ligne : https://www.arvalis.fr/infos-techniques/douze-indicateurs-pour-evaluer-la-fertilite-biologique-du-sol

Jenkinson D S, Powlson D S (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: A method for measuring soil biomass. Soil Biology and Biochemistry, vol. 8, no 3, p. 209-213.

Wu J, Pommerening B, Chaussod R, et al. (1990). Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction – an automated procedure. Soil Biology and Biochemistry, vol. 22, no 8, p. 1167-1169..

6 BIOMASSE MICROBIENNE MOLECULAIRE - ADN TOTAL

DÉFINITION

Les microorganismes (bactéries et champignons) sont les plus abondants et les plus diversifiés au sein de la biodiversité des sols. La biomasse microbienne moléculaire permet de mesurer l'abondance des microorganismes dans le sol, à partir de l'ADN total microbien.

NORME

NF EN ISO 11063 : Qualité du sol - Extraction directe de l'ADN du sol

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'ADN des microorganismes est extrait par lyse chimique et physique, puis quantifié par différentes méthodes (électrophorèse sur gel d'agarose, fluorométrie ou photométrie).

GAMME DE VARIATION

Situation / source	Unité	Min	Max	Médiane
Tous modes d'occupation des sols (n = 2 047)	µg d'ADN/g de sol	2	629	42
Grandes cultures (n=885)	µg d'ADN/g de sol	2	306	32
Prairies (n=536)	µg d'ADN/g de sol	2	455	65
Vignes et vergers (n=42)	µg d'ADN/g de sol	2	249	14
Forêts (n=584)	µg d'ADN/g de sol	2	629	53

Source : réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS, GIS-SOL, 2011), prélèvement sur 0-30cm

INTERPRÉTATION

Cet indicateur renseigne sur l'abondance de microorganismes.
Il peut être interprété en comparaison relative (comparaison entre deux pratiques ou dans le temps).
Il est à interpréter en fonction de certains paramètres physico-chimiques du sol, notamment texture, pH et teneur en carbone organique.
Une valeur de référence peut être calculée à partir des caractéristiques de sol (argile, pH, MO) et de l'altitude de la parcelle (cf Modèle INRAE Dijon, à partir données RMQS).

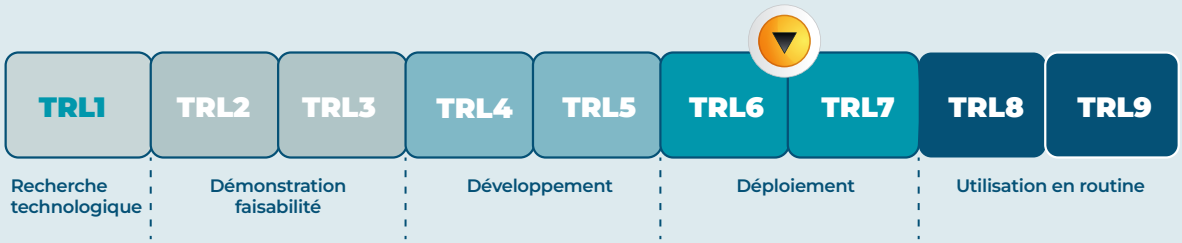
6 BIOMASSE MICROBIENNE MOLECULAIRE-ADN TOTAL

AVANTAGES / LIMITES

Méthode robuste et bien référencée

La procédure d'extraction peut différer selon les laboratoires, il est recommandé de solliciter le même laboratoire pour suivre une évolution.
La mesure de l'abondance des microorganismes du sol (vivants, morts, actifs ou non…) ne présage par de leur activité.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 50 - 100 €

SOURCES

Balloy B. et al., (2017). Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols [Disponible en ligne : https:// agriculture.gouv.fr/tour-dhorizon-des-indicateurs-relatifs-letat-organique-et-biologique-des-sols]

Gis Sol. 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

Karimi et al., 2018 – Atlas français des bactéries du sol. Biotope, Mèze, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 192 p.

Terrat et al.. Meta-barcoded evaluation of the ISO standard 11063 DNA extraction procedure to characterize soil bacterial and fungal community diversity and composition. Microbial Biotechnology, 2015, 8 (1), pp.131-142.

7 BIOMASSE BACTERIENNE DU SOL - ADNr 16S

DÉFINITION

La biomasse bactérienne du sol est un indicateur d'abondance basé sur la mesure de séquences de gènes bactériens après amplification par la réaction de polymérication en chaine (PCR) quantitative de l'ADN directement extrait du sol. Cette biomasse s'exprime en nombre de copies de gènes par gramme de sol sec.

NORME

Bien qu'il existe des normes ISO de référence pour la mesure de la biomasse bactérienne ADNr 16S, la présente fiche technique est élaborée sur la base d'un protocole publié et qui a été appliqué et validé dans différents contextes agropédoclimatiques (Gangneux et al. 2011). Les références normatives ci-après peuvent être utilisées pour l'application de la méthode de quantification d'ADNr 16S du sol décrite dans cette fiche technique.

- ISO 10381-6 : Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 6 : Lignes directrices pour la collecte, la manipulation et la conservation, dans des conditions aérobies, de sols destinés à l'évaluation en laboratoire des processus, de la biomasse et de la diversité microbiens
- ISO 11063 : Qualité du sol - Méthode pour extraire directement l'ADN d'échantillons de sol
- ISO 17601 : Qualité du sol - Estimation de l'abondance de séquences de gènes microbiens par amplification par réaction de polymérisation en chaîne (PCR)

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sols frais (ou congelé à -80°C, se renseigner auprès du laboratoire)

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

La méthode permet de mesurer l'abondance de séquences d'ADN ribosomique 16S (ADNr 16S), spécifiques aux bactéries et quantifiées dans l'extrait d'ADN du sol. Ces séquences spécifiques d'ADN bactérien sont quantifiées suite à leur amplification par réaction de polymérisation en chaîne (PCR) quantitative (qPCR) en utilisant un jeu spécifique d'amorces oligonucléotidiques.

Les amorces : primers (63f 5´-CAGGCCTAACACATGCAAGTC-3´ *(Marchesi et al. 1998)* et BU16S4 5´-CTGCTGCCTCCCGTAGG-3´) dérivé de 341F (Muyzer et al. 1993). Les référentiels présentés ici ont été acquis avec le protocole d'exctraction FastDNA SPIN Kit for soil- MP-Biomedicals et les amorces PCR suivantes : primers (63f 5´-CAGGCCTAACACATGCAAGTC-3´ *(Marchesi et al. 1998)* et BU16S4 5´-CTGCTGCCTCCCGTAGG-3´) dérivé de 341F (Muyzer et al. 1993).

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : Culture (n = 1541)		
		Min	Max	Médiane
Biomasse bactérienne (ADNr 16S)	Nombre de copie de gènes d'ADNr 16S/ g sol sec	3,94E+04	7,23E+13	3,07E+09

Par mode d'usage

Mode usage du sol	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane
Agroforesterie	33	5,98E+04	6,34E+06	7,78E+05
Culture	630	3,94E+04	5,36E+10	3,86E+09
Prairie	30	3,44E+09	2,45E+10	8,72E+09

Par texture pour le mode d'usage Grandes cultures

Mode usage du sol	Texture	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane
Culture	Très fines	12	2,68E+05	2,43E+06	5,19E+05
	Fines	143	7,62E+04	6,42E+09	8,97E+07
	Moyennes	411	3,73E+05	5,36E+10	4,91E+09
	Grossières	4	4,20E+12	1,83E+13	1,42E+13

Source : Programme ADEME Bioindicateurs 2, projet CASDAR Microbioterre et MycoAgra, référentiel interne UniLaSalle

7 BIOMASSE BACTERIENNE DU SOL - ADNr 16S

INTERPRÉTATION

Le rendement d'extraction d'ADN total du sol étant très dépendant du contexte textural, la mesure doit être effectuée dans un contexte textural déterminé.
Il est possible de positionner une valeur par rapport aux gammes de variation, sans présager de l'état de fonctionnement du sol.
- Faible : < 10E+6 copies de gènes /g sol sec
- Fort : > 10E+12 copies de gènes /g sol sec
- A relier au ratio champignons/bactéries

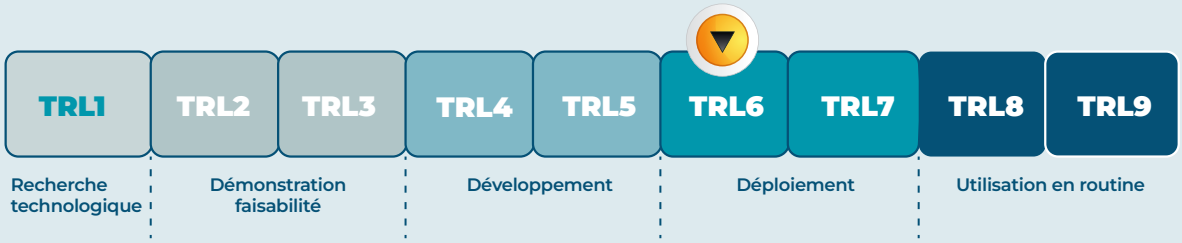
AVANTAGES / LIMITES

Cette mesure renseigne sur le potentiel microbien du sol en estimant le nombre de séquences d'ADNr 16S quantifiées dans l'extrait d'ADN du sol. Cette mesure sert à déterminer la proportion des populations bactériennes totales dans l'échantillon de sol pour un diagnostic de l'état du sol.

Il existe plusieurs types d'amorces permettant d'estimer l'abondance bactérienne dans le sol. Si cette diversité d'amorces représente un atout en termes de flexibilité méthodologique, elle complique toutefois la comparaison des résultats entre études. En cas de suivi, veiller à utiliser la même technique et les mêmes amorces.

La quantification du nombre de gènes d'ADNr 16S prend en compte l'ADN des bactéries vivantes et des bactéries mortes dont l'ADN n'est pas dégradé.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 50 - 100 €

SOURCES

Gangneux C., Akpa-Vinceslas M., Sauvage E., Desaire .S, Houot S., Laval K. 2011. Fungal, bacterial and plant dsDNA contributions to soil total DNA extracted from silty soils under different farming practices: Relationships with chloroform labile carbon. Soil Biology and Biochemistry, 43, 431–437.

Marchesi J R, Sato T, Weightman A J, Martin T A, Fry J C, Him S J, Dymock D, Wade W G. 1998. Design and evaluation of useful bacterium-specific PCR primers that amplify genes coding for bacterial 16S rRNA. Applied and Environmental Microbiology, 64, 795–799.

Muyzer G., De Waal E. C., Uitter linden A. C. 1993. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel-electrophoresis analysis of polymerase chain reaction amplified genes-coding for 16S ribosomal-RNA. Applied and Environmental Microbiology, 59, 695–700.

Thiollet-Scholtus M., Muller A. , C.Abidon, J.Grignon, O. Keichinger, R.Koller, A. Langenfeld, L.ley, N. Nassr, C. Rabolin-Meinrad, J, Wohlfahrt. 2021. Mulidimensional assessment demonstrates suistainability of new low-imput viticulture systems in north-eastern France. Europen Journal of Agronomy, 1161-0301.

8 BIOMASSE FONGIQUE DU SOL - ADNr 18S

BIODIVERSITE CARBONE STRUCTURE DU SOL

DÉFINITION

La biomasse fongique du sol est un indicateur d'abondance basé sur la mesure de séquences de gènes fongiques après amplification par la réaction de polymérication en chaine (PCR) quantitative de l'ADN directement extrait du sol. Cette biomasse s'exprime en nombre de copies de gènes par gramme de sol sec.

NORME

Bien qu'il existe des normes ISO de référence pour la mesure de la biomasse fongique a travers l'ADNr 18S (gène codant pour l'ADNr 18S), la présente fiche technique est élaborée sur la base d'un protocole publié et qui a été appliqué et validé dans différents contextes agropédoclimatiques (Gangneux et al., 2011). Les références normatives ci-après peuvent être utilisées pour l'application de la méthode de quantification de l'ADNr 18S du sol décrite dans cette fiche technique.

- ISO 10381-6 : Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 6 : Lignes directrices pour la collecte, la manipulation et la conservation, dans des conditions aérobies, de sols destinés à l'évaluation en laboratoire des processus, de la biomasse et de la diversité microbiens
- ISO 11063 : Qualité du sol - Méthode pour extraire directement l'ADN d'échantillons de sol
- ISO 17601 : Qualité du sol - Estimation de l'abondance de séquences de gènes microbiens par amplification par réaction de polymérisation en chaîne (PCR).

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais (ou congelé à -80°C, se renseigner auprès du laboratoire)

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

La méthode permet de mesurer l'abondance de séquences d'ADN ribosomique 18S (ADNr 18S), spécifiques aux champignons et quantifiées dans l'extrait d'ADN du sol. Ces séquences spécifiques d'ADN fongiques sont quantifiées suite à leur amplification par réaction de polymérisation en chaîne (PCR) quantitative (qPCR) en utilisant un jeu spécifique d'amorces oligonucléotidiques.

Les amorces sont : primer (FU18S1 5´-GGAAACTCACCAGGTCCAGA-3´ et Nu-SSU-1536 5´ ATTGCAATGCYCTATCCCCA-3´) (Borneman and Hartin, 2000)

Les référentiels présentés ici ont été acquis avec le protocole d'exctraction FastDNA SPIN Kit for soil- MP-Biomedicals et les amorces PCR suivantes: primer (FU18S1 5´-GGAAACTCACCAGGTCCAGA-3´ et Nu-SSU-1536 5´ ATTGCAATGCYCTATCCCCA-3´) (Borneman and Hartin, 2000)

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : Culture (n = 1541)		
		Min	Max	Médiane
Biomasse fongique (ADNr 18S)	nombre de copies de gènes/ g sol sec	0	7,94E+12	1,14E+08

Par mode d'usage

Mode usage du sol	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane
Agroforesterie	33	2,24E+07	3,31E+08	8,01E+07
Culture	828	1,78E+05	7,94E+12	1,39E+08
Prairie	30	6,38E+07	4,81E+08	1,15E+08

Par texture pour le mode d'usage Grandes cultures

Mode usage du sol	Texture	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane
Culture	Très fines	32	1,80E+07	4,67E+12	9,15E+11
	Fines	159	9,71E+06	2,61E+12	4,02E+07
	Moyennes	551	1,78E+05	7,94E+12	2,74E+08
	Grossières	4	8,28E+11	1,58E+12	9,53E+11

Source : Programme ADEME Bioindicateurs 2, projet CASDAR Microbioterre et MycoAgra, référentiel interne UniLaSalle

8 BIOMASSE FONGIQUE DU SOL - ADNr 18S

INTERPRÉTATION

Il est possible de positionner une valeur par rapport aux gammes de variation, sans présager de l'état de fonctionnement du sol.

. Faible : < 10E+4 copies de gènes /g sol sec

. Fort : > 10E+9 copies de gènes /g sol sec

Les mesures de biomasse fongique par qPCR doivent toujours être interprétées en lien avec celles de la biomasse bactérienne, afin d'évaluer le ratio champignons/bactéries (F/B). Ce ratio constitue un indicateur intégré du fonctionnement biologique des sols, notamment en lien avec les dynamiques de matière organique, la stabilité des agrégats ou encore la prédominance de certains processus microbiens. Sans cette mise en perspective, la seule mesure de la biomasse fongique reste partielle et peut conduire à des interprétations limitées ou biaisées de l'état biologique du sol.

AVANTAGES / LIMITES

Cette mesure renseigne sur le potentiel microbien du sol en estimant le nombre de séquences d'ADNr18S quantifiées dans l'extrait d'ADN du sol. Cette mesure sert à déterminer la proportion des populations fongiques totales dans l'échantillon de sol pour un diagnostic de l'état du sol.

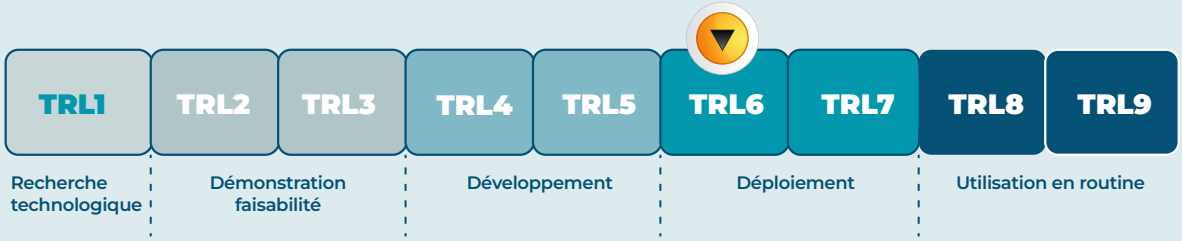
Elle est applicable à toutes cultures et tous types de sol.

Le rendement d'extraction d'ADN étant très dépendant de la texture du sol, la mesure doit être effectuée dans un contexte textural déterminé.

Il existe plusieurs types d'amorces permettant d'estimer l'abondance fongique dans le sol. Si cette diversité représente un atout en termes de flexibilité méthodologique, elle complique toutefois la comparaison des résultats entre études. En cas de suivi, veiller à utiliser la même technique et les mêmes amorces.

La quantification du nombre de gènes d'ADNr 18S prend en compte l'ADN des champignons vivants et des champignons morts dont l'ADN n'est pas dégradé.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 50 - 100 €

SOURCES

Gangneux C, Akpa-Vinceslas M, Sauvage E, Desaire S, Houot S, Laval K. 2011. Fungal, bacterial and plant dsDNA contributions to soil total DNA extracted from silty soils under different farming practices: Relationships with chloroform labile carbon. Soil Biology and Biochemistry, 43, 431–437.

Borneman, J., Hartin, R.J., 2000. PCR primers that amplify fungal rRNA genes from environmental samples. Appl. Environ. Microbiol. 66, 4356–4360

M.Thiollet-Scholtus, A.Muller, C.Abidon, J.Grignon, O. Keichinger, R.Koller, A. Langenfeld, L.ley, N. Nassr, C. Rabolin-Meinrad, J, Wohlfahrt. 2021. Mulidimensional assessment demonstrates suistainability of new low-imput viticulture systems in north-eastern France. Europen Journal of Agronomy, 1161-0301.

9 TAUX DE MYCORHIZATION

DÉFINITION

Le taux de mycorhization est un indicateur d'abondance des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) dans les racines de plantes. Il estime le pourcentage de colonisation des racines par un ou des champignons mycorhiziens à partir d'une technique de coloration permettant d'observer au microscope des structures spécifiques telles que les arbuscules, les vésicules et les hyphes.

NORME

Méthode de référence : Trouvelot A., Kough J.L., Gianinazzi-Pearson V., 1986. Mesure du Taux de Mycorhization VA d'un Système Radiculaire. Recherche de Méthodes d'Estimation Ayant une Signification Fonctionnelle. In Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae; Gianinazzi-Pearson, V., Gianinazzi, S., Eds.; INRA Press: Paris, France, pp. 217–221.

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Le prélèvement de racines s'effectue en période de forte croissance de la plante (au plus tôt 2 à 3 mois après semis).

La mesure est réalisée sur les très fines racines et radicelles (< 1mm de diamètre), les plus grosses racines de l'échantillon sont écartées. Les racines peuvent être conservées pendant 3-4 jours immergées dans de l'eau au réfrigérateur.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'estimation de la colonisation des racines par les champignons mycorhiziens à arbuscules se fait grâce à la méthode de Trouvelot et al. (1986). Trente (30) fragments racinaires de 1 cm par échantillon sont examinés.

Cette méthode consiste à évaluer (i) la colonisation par les champignons mycorhiziens de chaque fragment observé en lui attribuant une note entre 0 et 5, (ii) l'abondance des arbuscules par fragment de A0 (pas d'arbuscule) à A3 (arbuscules abondants).

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : Culture (n = 30 obs.)		
		Min	Max	Médiane
Taux de mycorhization	%	0	100	50

INTERPRÉTATION

- Faiblement mycorhizé < 25% : **Faible**
- Moyennement mycorhizé 25 - 50% : **Moyen**
- Bien mycorhizé 50 - 75% : **Elevé**
- Fortement mycorhizé > 75% : **Très Elevé**

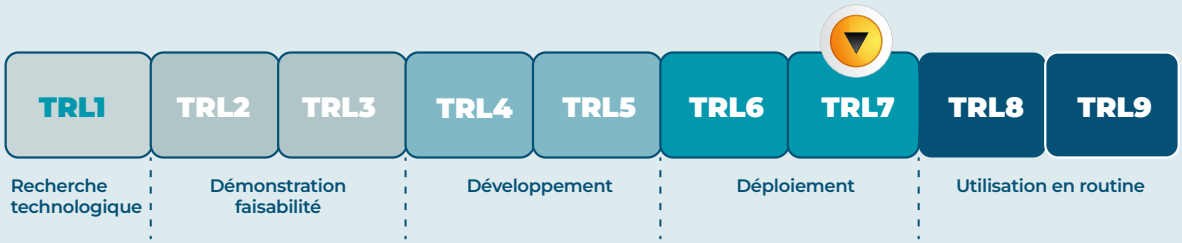
9 TAUX DE MYCORHIZATION

AVANTAGES / LIMITES

La mycorhization des racines améliore l'alimentation hydrique et minérale de la plante. Le premier bénéfice de la symbiose est donc d'ordre nutritif. Les vésicules et les arbuscules constituent le siège des échanges symbiotiques et sont les meilleurs indicateurs de la fonctionnalité de la mycorhize observée.

La mesure du taux de mycorhization est très dépendante de la plante (espèce, variété, niveau de prélèvement…) et de son milieu de vie (type de sol, pratique de fertilisation…). Pour cette raison, d'autres indicateurs comme le dosage de la glomaline pourrait être pris en compte, en plus du taux de mycorhization, pour évaluer de manière satisfaisante l'effet des pratiques culturales sur le taux de mycorhization au champ.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 50 à 100 €

SOURCES

Thioye, B., Legras, M., Castel, L., Hirissou, F., Chaftar, N., & Trinsoutrot-Gattin, I., 2022. Understanding Arbuscular Mycorrhizal Colonization in Walnut Plantations: The Contribution of Cover Crops and Soil Microbial Communities. Agriculture, 12(1), 1. https://doi.org/10.3390/agriculture12010001

Thioye B., Sanguin H., Kane, A. et al., 2021. Mycorrhizal inoculation increases fruit production without disturbance of native arbuscular mycorrhizal community in jujube tree orchards (Senegal). Symbiosis 83, 361–372 (2021). https://doi.org/10.1007/s13199-021-00757-5

Casdar MycoAgra, projets CEGA et TANGGO [projets non publiés]

10 CINETIQUE DE MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE DU SOL

DÉFINITION

La minéralisation de l'azote organique du sol est un processus biologique sous l'influence des conditions environnementales (principalement température et humidité) mais aussi des caractéristiques biologiques, physiques et chimiques du sol. Le suivi temporel de la minéralisation de l'azote du sol permet de renseigner sur la dynamique d'évolution des matières organiques du sol en conditions contrôlées (lien fort avec la fiche cinétique de minéralisation du carbone) : on évalue ainsi un potentiel de minéralisation en conditions optimales.

NORME

NF EN ISO 14238 : Qualité du sol - Méthodes biologiques - Détermination de la minéralisation de l'azote et de la nitrification dans les sols, et de l'influence des produits chimiques sur ces processus.

FD U44-163 : Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote. Le protocole d'analyse réalisé en laboratoire fait référence à ces deux normes.

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'échantillon de sol frais est tamisé pour éliminer les éléments grossiers et débris végétaux (tamisage de 2 mm à 5 mm selon les laboratoires). Les échantillons préparés sont incubés à une température constante (généralement 28°C), une humidité constante proche de la capacité au champ et à l'obscurité pendant 28 jours.

A intervalles réguliers, les azotes nitrique et ammoniacal sont extraits dans une solution de chlorure de potassium (KCl) puis dosés par colorimétrie à flux continu (NF EN ISO 11732 et NF EN ISO 13395) ou par chromatographie ionique. La quantité d'azote minéralisé à chaque date de mesure est obtenue par calcul en soustrayant la quantité d'azote minéral présente dans le sol en début d'incubation. Les résultats sont exprimés en mg d'azote minéralisé par kg de terre équivalent sèche et en % de l'azote total.

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : Sol Grandes culture et polyculture-élevage France / Microbioterre (n = 182 obs.) horizon 0-20cm		
		Min	Max	Médiane
Azote minéralisé à 28 jours	mg/kg	1.0	39.4	15.6
	% N tot	0.1	2.3	1,0

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : viticulture France (projet SolAR et essai IFV Sud-ouest) (n = 198) horizon 0-20cm		
		Min	Max	Médiane
Azote minéralisé à 28 jours	mg/kg	1.5	54.4	20.1
	% N tot	0.2	4.1	2.0

INTERPRÉTATION

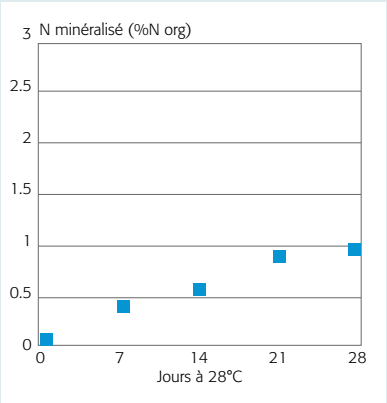
Le potentiel de minéralisation de l'azote organique du sol est un indicateur d'activité microbiologique.

Les résultats peuvent être représentés sous forme graphique pour voir la dynamique d'évolution de la minéralisation de l'azote.

L'azote minéralisé en fin d'incubation (28 jours) est le principal résultat utilisé pour l'interprétation. Il permet d'estimer la fourniture potentielle d'azote minéral du sol (28 jours à 28°C correspondent à 5 à 8 mois en condition terrain).

C'est également un indicateur précoce de la réponse des microorganismes du sol à un changement de pratique culturale, plus sensible que la teneur en azote total du sol.

Pour la bonne interprétation du potentiel de minéralisation de l'azote organique, il est conseillé de réaliser une analyse de terre en complément (matière organique, C/N, texture, pH).



10 CINETIQUE DE MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE DU SOL

AVANTAGES / LIMITES

Méthode de référence pour l'estimation de la minéralisation de l'azote organique du sol.
Valorisation opérationnelle dans le raisonnement de la fertilisation azotée.

Analyse longue (6 à 8 semaines)
Elle est réalisée sur un échantillon de sol brut, ce qui entraîne des contraintes dans la période de prélèvement et un envoi rapide au laboratoire.

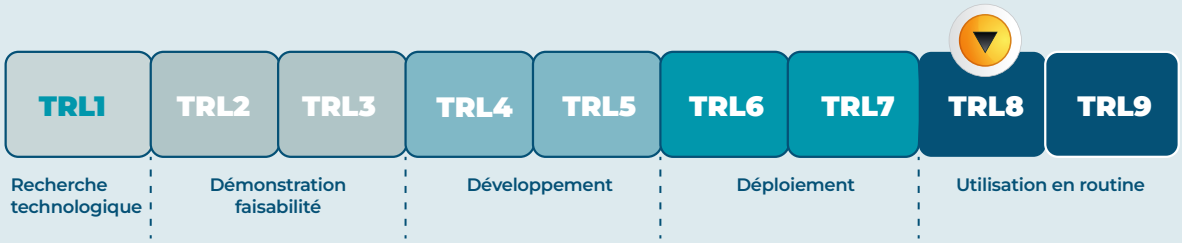
AUTRES MÉTHODES D'ESTIMATION DU POTENTIEL DE MINÉRALISATION

D'autres méthodes existent pour approcher la fraction d'azote minéralisable à court terme (cycle cultural) : l'Azote Biologiquement Minéralisable (ABM) et l'Azote Potentiellement Minéralisable (APM) (se référer à leur fiche pour plus d'informations). Le tableau ci-dessous permet de comparer leur niveau d'opérationnalité :

	Méthode	Norme	Préparation	Simplicité	Rapidité	Coût	Référencement
N minéralisé 28 J	Incubation aérobie 28 jours 28°C	XP U44-163 et NF ISO 14238	Sol brut tamisé 5 mm	- -	⌛⌛⌛⌛	€€€€	*Méthode de référence en France (Bouthier et al, 2015 ; Déplanche, 2021)*
APM (Azote Potentiellement Minéralisable)	Double distillation Kjeldahl partielle (KCl et tampon phosphate borate)	Non (Gianello et Bremner, 1986)	Sol séché tamisé 2 mm	-	⌛⌛	€€	*Travaux d'In Vivo (Rocca et al, 2013), Réseau Mh / Sol-AID (http://geowww.agrocampus-ouest.fr/web/?page_id=2804)*
ABM (Azote Biologiquement Minéralisable)	Incubation anaérobie 7 jours 40°C	Non (Keeney & Bremner,1966 ; Schomberg et al., 2009)	Sol brut tamisé 5 mm	+ +	⌛⌛	€€	*Etudes internationales (Clark, 2018 ; Curtin et al, 2017 ; Orcellet et al 2016), réseau Mh, Microbioterre*

Ces trois méthodes ont chacune leurs avantages et inconvénients. Le choix de la méthode se fera donc selon le contexte et les objectifs de l'analyse. Par exemple, le potentiel par incubation sera plus pertinent en expérimentation. L'APM se justifiera pour le paramétrage des logiciels de plan de fumure utilisant cet indicateur. L'ABM donnera une indication sur l'activité biologique de minéralisation et, combiné à d'autres indicateurs, permettra d'orienter le choix de pratiques culturales.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 100 à 150 €
- Utilisable en situation de conseil

SOURCES

Bonisseau, M., Cahurel, J.-Y., & Gontier, L., 2024. Apports organiques et impacts sur le sol : Retours d'expérience de trois projets menés au sein de l'IFV. Colloque EUROVITI, SIVAL, Angers, France.

Cusset E., Bennegadi-Laurent N., Recous S., Bernard P. Y., Perrin A. S., Tscheiller R., ... & Riah-Anglet, W. (2024). Which soil microbial indicators should be included in routine laboratory tests to support the transition to sustainable management of arable farming systems? A meta-analysis. Ecological Indicators, 167, 112706.

Perrin A.-S., Tscheiller R., Riah-Anglet W., Cusset E., Valé M., et al. Microbioterre : référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des apports de matières organiques au champ. Innovations Agronomiques, 2023, 88, pp.15-30.

CURTIN D., & CAMPBELL C. A. Mineralizable nitrogen. Soil sampling and methods of analysis, 2008, vol. 2, p. 599-606.

11 CINETIQUE DE MINERALISATION DU CARBONE ORGANIQUE DU SOL

DÉFINITION

La minéralisation du carbone organique du sol est un processus biologique sous l'influence des conditions environnementales (principalement température et humidité) mais aussi des caractéristiques biologiques, physiques et chimiques du sol.

L'étude en conditions contrôlées de la dynamique du dégagement de dioxyde de carbone par le sol (lien fort avec la fiche cinétique minéralisation de l'azote) est un moyen simple pour évaluer cette minéralisation : on évalue ainsi un potentiel de minéralisation en conditions optimales.

NORME

NF EN ISO 16072 : Qualité du sol - Méthodes de laboratoire pour la détermination de la respiration microbienne du sol.

FD U44-163 : Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote. Le protocole d'analyse réalisé en laboratoire fait référence à ces deux normes.

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'échantillon de sol frais est tamisé pour éliminer les éléments grossiers et débris végétaux (tamisage de 2 mm à 5 mm selon les laboratoires). Les échantillons préparés sont incubés à température et humidité constantes (généralement 28°C et 80 % de l'humidité à la capacité au champ), dans des enceintes hermétiquement fermées pendant 28 jours. Le CO_2 dégagé par le processus de minéralisation est piégé dans une solution de soude (NaOH) puis dosé selon différentes méthodes (volumétrie, colorimétrie, dosage du carbone en solution ou tout autre méthode équivalente).

Le carbone minéralisé à une date donnée est calculé par cumul des mesures de carbone minéralisé aux dates précédentes.

Les résultats sont exprimés en mg de carbone minéralisé par kg de terre équivalent sèche et en % du carbone organique total.

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : Sol Grandes cultures et polyculture-élevage France / Microbioterre (n = 182 obs.) horizon 0-20cm		
		Min	Max	Médiane
Carbone minéralisé à 28 jours	mg/kg	44	373	202
	% C org	0,5	3,1	1,4

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : viticulture France (projet SolAR et essai IFV Sud-ouest) (n = 198) horizon 0-20cm		
		Min	Max	Médiane
Carbone minéralisé à 28 jours	mg/kg	71	1322	341
	% C org	1,3	6,0	3,0

11 CINETIQUE DE MINERALISATION DU CARBONE ORGANIQUE DU SOL

INTERPRÉTATION

Le potentiel de minéralisation du carbone organique du sol est un indicateur d'activité microbiologique.

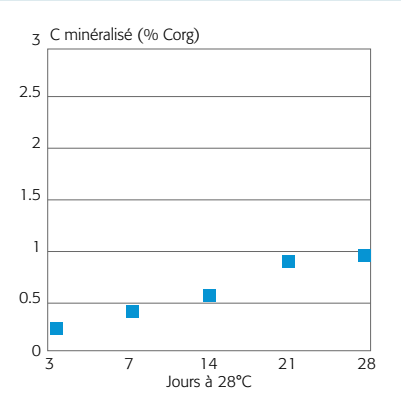
Les résultats peuvent être représentés sous forme graphique pour voir la dynamique d'évolution de la minéralisation du carbone.

Le carbone minéralisé en fin d'incubation (28 jours) est le principal résultat utilisé pour l'interprétation. Il permet d'estimer la perte potentielle en carbone organique du sol (28 jours à 28°C correspondent à 5 à 8 mois en condition terrain). Il renseigne donc sur la fonction de stockage et transformation du carbone dans les sols, ainsi que sur la fourniture en nutriments (issus de la minéralisation de la MO)

C'est également un indicateur précoce de la réponse des microorganismes du sol à un changement de pratique culturale, plus sensible que le stock total de matière organique.

Pour la bonne interprétation du potentiel de minéralisation du carbone organique, il est conseillé de réaliser une analyse de terre en complément (matière organique, C/N, texture, pH).

Exemple de courbe de minéralisation du carbone, exprimée en % du carbone organique total



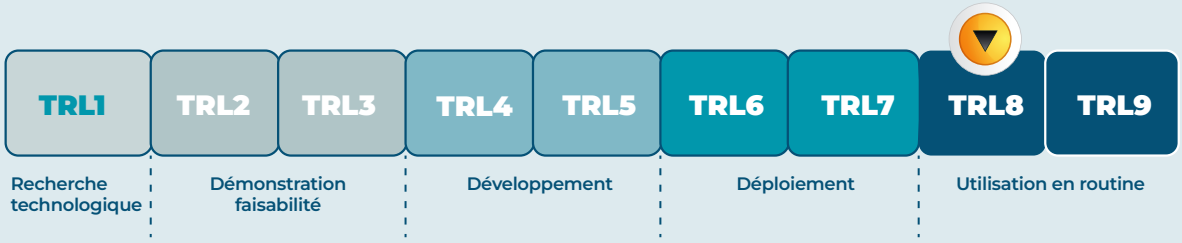
AVANTAGES / LIMITES

Méthode de référence pour la mesure de la respiration microbienne

Analyse longue (6 à 8 semaines)

Elle est réalisée sur un échantillon de sol brut, ce qui entraîne des contraintes dans la période de prélèvement et un envoi rapide au laboratoire.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 100 à 150 €
- Utilisable en situation de conseil

SOURCES

Bonisseau, M., Cahurel, J.-Y., & Gontier, L., 2024. Apports organiques et impacts sur le sol : Retours d'expérience de trois projets menés au sein de l'IFV. Colloque EUROVITI, SIVAL, Angers, France.

Cusset E., Bennegadi-Laurent N., Recous S., Bernard P. Y., Perrin A. S., Tscheiller R., ... & Riah-Anglet, W. (2024). Which soil microbial indicators should be included in routine laboratory tests to support the transition to sustainable management of arable farming systems? A meta-analysis. Ecological Indicators, 167, 112706.

Perrin A.-S., Tscheiller R., Riah-Anglet W., Cusset E., Valé M., et al. Microbioterre : référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des apports de matières organiques au champ. Innovations Agronomiques, 2023, 88, pp.15-30.

CURTIN D., & CAMPBELL C. A. Mineralizable nitrogen. Soil sampling and methods of analysis, 2008, vol. 2, p. 599-606.

12 MESURE DE L'ACTIVITE ENZYMATIQUE GLOBALE : METHODE FDA
(FLUORESCEINE DI-ACETATE)

DÉFINITION

La mesure de l'hydrolyse de la fluorescéine di-acétate (FDA) est une méthode utilisée pour évaluer l'activité microbienne globale dans les sols. Cette méthode repose sur la capacité des microorganismes du sol à hydrolyser la FDA en libérant de la fluorescéine, grâce à des enzymes hydrolytiques telles que les lipases, protéases et estérases. La quantité de fluorescéine libérée reflète l'activité biologique globale du sol.

NORME

Il n'existe pas de norme spécifique pour la mesure de l'hydrolyse de la FDA en spectrophotométrie. Cependant, des protocoles de mesure bien établis sont disponibles dans la littérature scientifique, largement utilisés et validés pour évaluer l'activité microbienne globale des sols (Adam et Duncan, 2001)

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais (ou congelé à -80°C, se renseigner auprès du laboratoire).

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

La méthode de mesure de l'activité du fluorescéine diacétate (FDA) repose sur l'hydrolyse de ce substrat par des enzymes hydrolytiques présentes dans le sol, comme les lipases, protéases et estérases.

Cette réaction enzymatique libère de la fluorescéine, une molécule fluorescente dont l'intensité peut être mesurée par spectrophotométrie. La quantité de fluorescéine libérée est proportionnelle à l'activité enzymatique globale dans le sol.

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité	Tout modes d'occupation de sol et types de textures de sols confondus (n = 388 obs.)		
		Min	Max	Médiane
Hydrolyse de la fluorescéine diacétate (FDA)	nanomole/min et par g de sol sec (UE)	0	109,7	17,7

Par mode d'usage

Mode usage du sol	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane
Culture	257	0,0	70,6	21,8
Prairie	24	0,0	3,4	1,7
Forêt	39	0,0	8,6	1,4
Verger	24	1,1	109,7	58,4

Par texture pour le mode d'usage Grandes cultures

Mode usage du sol	Texture	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane
Culture	Très fines	24	0	28,66	15,29
	Fines	20	0,84	32,12	17,25
	Moyennes	187	0,03	70,59	23,92
	Grossières	8	0,3	45,49	19,59

Programme Bioindicateurs 2, Microbioterre, référentiel interne Unilasalle

12 MESURE DE L'ACTIVITE ENZYMATIQUE GLOBALE : METHODE FLUORESCEINE DI-ACETATE (FDA)

INTERPRÉTATION

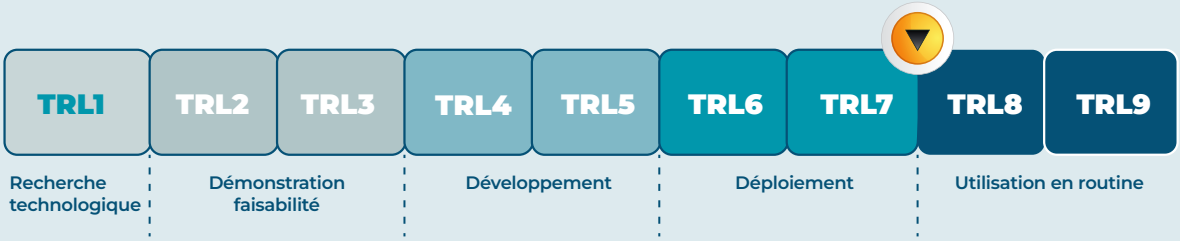
Un taux élevé d'hydrolyse de la FDA (et donc de libération de fluorescéine) indique une forte activité enzymatique dans le sol, suggérant une activité microbienne élevée. Cela traduit une communauté microbienne dynamique et active, capable de dégrader la matière organique et de participer aux cycles biogéochimiques.

AVANTAGES / LIMITES

Indicateur intégratif de l'activité des microorganismes des sols
Analyse peu coûteuse

Protocole de mesure non miniaturisé ne permettant pas de traiter un grand nombre d'échantillons par jour
Existence de plusieurs protocoles de mesure de la FDA dans les sols. En cas de suivi, veiller à utiliser la même méthode de mesure.
Existence de protocoles miniaturisés mais uniquement en fluorimétrie

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 30 à 65 €
- Utilisable en situation de conseil

REMARQUE

Il est essentiel de mesurer un ensemble d'activités enzymatiques plutôt qu'une seule afin d'évaluer de manière pertinente l'état biologique fonctionnel des sols.

SOURCES

Adam, G.; Duncan, H. Development of a Sensitive and Rapid Method for the Measurement of Total Microbial Activity Using Fluorescein Diacetate (FDA) in a Range of Soils. Soil Biol. Biochem. 2001, 33, 943–951.

13 β-GLUCOSIDASE (GLU)

DÉFINITION

La β-glucosidase est une enzyme produite par divers organismes, mais provient majoritairement des microorganismes du sol. Elle joue un rôle essentiel dans le cycle du carbone. Cette enzyme catalyse la dernière étape de la dégradation de la cellulose et d'autres glucosides présents dans la matière organique (MO), permettant ainsi la libération de glucose, comme source d'énergie accessible pour les microorganismes. Elle est souvent présente en grande abondance dans les sols, comparativement à d'autres enzymes participant au recyclage du carbone.

NORME

ISO 20130:2018 : Qualité du sol - Mesure de l'activité enzymatique dans des échantillons de sol en utilisant des substrats colorimétriques

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais (ou congelé à -80°C, se renseigner auprès du laboratoire)

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

La méthode de mesure repose sur un dosage colorimétrique.

Après une réaction enzymatique dans le sol utilisant le substrat p-nitrophényl-β-D-glucopyranoside (pNPG), la β-glucosidase libère du p-nitrophénol (p-NP), dont la quantité est mesurée par spectrophotométrie. La concentration de p-NP est alors proportionnelle à l'activité enzymatique dans le sol.

La mesure de cette activité enzymatique reflète une activité potentielle dans le sol.

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité	Tout mode d'occupation de sol et types de textures de sols confondus (n = 1062 obs.)		
		Min	Max	Médiane
β-D-glucosidase	nanomole/min et par g de sol sec (UE)	0	195,83	15,86

Par mode d'usage

Mode usage du sol	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane
Agroforesterie	32	10,5	41,2	25,4
Culture	815	0,0	68,5	15,9
Prairie	36	1,8	13,4	8,7
Forêt	40	0,0	19,0	5,3
Verger	24	9,3	23,9	15,5
Bois	43	0,3	25,6	9,4

Par texture pour le mode d'usage grandes cultures

Mode usage du sol	Texture	Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Médiane
Culture	Très fines	36	6,66	67,8	31,44
	Fines	163	3,81	68,51	19,9
	Moyennes	496	0	50,42	14,88
	Grossières	8	1,17	10,51	4,97

Programme ADEME BioIndicateurs 2, projet CASDAR Microbioterre et MycoAgra, référentiel interne UniLaSalle

13 β-GLUCOSIDASE (GLU)

INTERPRÉTATION

Une activité élevée de la β-glucosidase dans le sol indique une forte capacité de décomposition de la matière organique. Une valeur élevée correspond à une minéralisation élevée de la MO.

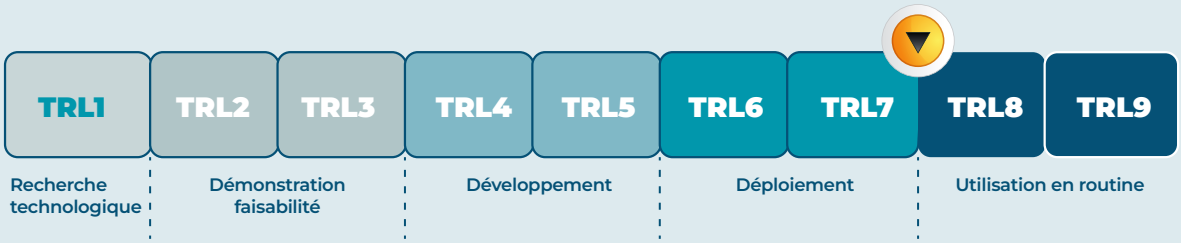
Remarque : une absence d'activité enzymatique (valeur 0) n'indique pas une absence de la minéralisation du carbone. Il est vivement recommandé de recourir à un panel d'enzymes pour établir un diagnostic fiable.

AVANTAGES / LIMITES

Analyse peu coûteuse
Mesure compatible avec analyse haut débit grâce à un protocole miniaturisé en microplaques

Cette mesure est très liée au contexte textural (*Microbioterre, Petitjean et al., 2019*) : plus la teneur en argile (texture fine) est élevée et plus cette activité est élevée (protection de l'enzyme par les particules d'argile, rétention de la MO, stabilisation des complexes organo-minéraux)

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 20 à 50 €
- Utilisable en situation de conseil

REMARQUE

Il est essentiel de mesurer un ensemble d'activités enzymatiques plutôt qu'une seule afin d'évaluer de manière pertinente l'état fonctionnel biologique d'un sol.

SOURCES

Balloy B. et al., (2017). Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols [Disponible en ligne : https://agriculture.gouv.fr/tour-dhorizon-des-indicateurs-relatifs-letat-organique-et-biologique-des-sols]

Cheviron N., Grondin V., Marrauld C., Poiroux F., Bertrand I., Abadie J., Pandard P., Riah-Anglet W., Dubois C., Maly S, MarquesC.R., Valverde Asenjo I., Alonso A., Marquina Diaz D., Mougin C., 2021. Inter-Laboratory Validation Of An ISO Test Method For Measuring Enzyme Activities In Soil Samples Using Colorimetric Substrates. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-517834/v1

Deschamps T. et al. (2022). Guide d'interprétation à l'analyse des bioindicateurs. [En ligne : https://www.arvalis.fr/infos-techniques/douze-indicateurs-pour-evaluer-la-fertilite-biologique-du-sol]

Petitjean C., Philibert A., Manneville V., Amiaud B., Perrin A.-S., Charrier X., Gastal F., de Vliegher A., Willekens K., Montenach D., Houot S., Morvan T., Piutti S. - 2019 - Biomasse microbienne carbonée et activités enzymatiques : gammes de valeurs obtenues pour différents sols agricoles français et belges, 26, Etude et Gestion des Sols, 81-92

Taibi S., Lepelletier P., Dantan J., Bodin J., Dur J. C. D., & Rouge, L., 2012. PROGRAMME ADEME BIOINDICATEUR II–RAPPORT FINAL Gestion et Traitement des données du programme Bioindicateurs II Approche statistique de sélection d'Indicateurs et de Biomarqueurs dans la surveillance de la qualité des sols et l'évaluation des risques (Doctoral dissertation, Esitpa-ADEME).

14 GLOMALINE – PROTEINES DU SOL ASSOCIEES A LA GLOMALINE (GRSP : GLOMALIN RELATED SOIL PROTEIN)

DÉFINITION

La glomaline est une glycoprotéine sécrétée à la surface des hyphes et des spores des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA). Dotée de propriétés hydrophobes, thermostables et hautement résistantes à la dégradation, elle interagit fortement avec les composés organiques, les particules d'argile, les minéraux, les oxydes métalliques et divers microorganismes. Présente dans la matière organique du sol, elle peut représenter jusqu'à un tiers du carbone organique total. Sa quantification permet d'estimer l'abondance des protéines associées aux hyphes et spores des CMA – qu'ils soient vivants, morts ou en dormance – sans pour autant refléter directement leur activité physiologique.

NORME

Il n'existe pas de norme ISO ou AFNOR

ECHANTILLONNAGE / CONDITIONNEMENT

Analyse sur sol frais.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'extraction des protéines est réalisée à partir de 1 g de sol, puis leur quantification est effectuée selon la méthode colorimétrique de Bradford. Les glomalines sont distinguées analytiquement en deux fractions, selon leur mode d'extraction : la fraction facilement extractible (EE-GRSP) et la fraction totale (T-GRSP).

La différenciation repose sur les conditions d'extraction, notamment l'utilisation de solutions de citrate de sodium (20 mM pour EE-GRSP et 50 mM pour T-GRSP), suivie d'un traitement par autoclavage (30 à 60 minutes), puis d'une étape de centrifugation, conformément aux protocoles de Wright et Upadhyaya (1996, 1998).

GAMME DE VARIATION

Système agricole	Indicateur	Nbre d'obs.	Min	Max	Médiane
Noyer	Glomaline (mg/g)	71	1,6	24,4	5,9
Agroforesterie	Glomaline (mg/g)	32	1,7	5,6	3,6
Grandes cultures	Glomaline (mg/g)	67	0,0	13,6	3,6

Source : référentiel interne Unilasalle

INTERPRÉTATION

Les modes d'utilisation des terres influencent significativement les stocks de glomaline dans le sol. Des pratiques telles que l'absence de labour, les systèmes de semis direct, la conservation des sols ou encore le maintien d'une couverture végétale permanente favorisent la préservation des réseaux fongiques mycorhiziens, et donc la production de glomaline.

Cet indicateur peut être utilisé de manière relative, pour comparer différentes pratiques agricoles ou suivre l'évolution d'un système dans le temps. Toutefois, son interprétation doit toujours être replacée dans le contexte physico-chimique du sol, notamment en lien avec la teneur en carbone organique, souvent corrélée aux concentrations de glomaline dans les écosystèmes.

La glomaline contribue à la stabilisation des agrégats, ce qui permet de réduire la décomposition de la matière organique en protégeant physiquement les particules du sol de l'action enzymatique. Elle est ainsi un indicateur pertinent du potentiel de séquestration du carbone à long terme et de la qualité structurale des sols.

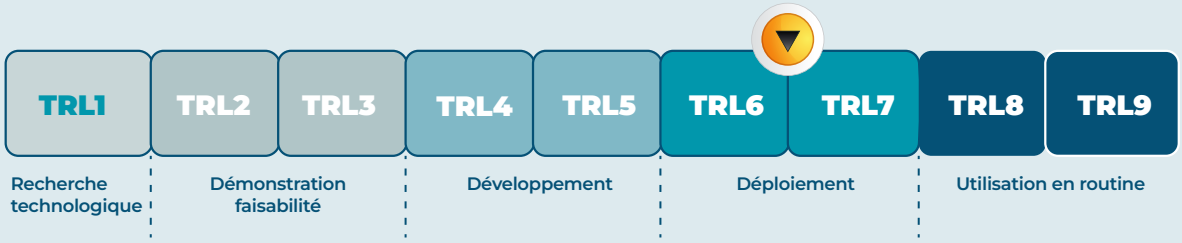
14 GLOMALINE – PROTEINES DU SOL ASSOCIEES A LA GLOMALINE (GRSP : GLOMALIN RELATED SOIL PROTEIN)

AVANTAGES / LIMITES

Méthode simple et économique, adaptée à une utilisation de routine en laboratoire. La glomaline joue un rôle clé dans la stabilisation des microagrégats du sol, augmentant le temps de séquestration du carbone. Elle contribue à améliorer la structure du sol, favorisant les échanges gazeux, ainsi que la rétention de l'eau et des éléments minéraux, ce qui en fait un indicateur étroitement lié à la fertilité des sols.

Il n'existe pas de protocole standardisé pour l'extraction de la glomaline sous forme pure. La définition de l'extrait protéique dépend fortement de la méthode d'extraction utilisée, susceptible de varier d'un laboratoire à l'autre. Pour garantir la comparabilité des résultats, il est donc essentiel de se référer à une méthode d'extraction uniforme.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 50 - 100 €

SOURCES

Agnihotri, R., Sharma, M. P., Prakash, A., Ramesh, A., Bhattacharjya, S., Patra, A. K., ... & Kuzyakov, Y. (2022). Glycoproteins of arbuscular mycorrhiza for soil carbon sequestration: Review of mechanisms and controls. Science of the Total Environment, 806, 150571.

Delporte F., Vanwindekens F., Abras M., Arlotti D., Reuter V., Leroy C., Huyghebaert B. and Mesplou S. (2023) Soil proteins as biochemical indicators of the plant-soil-microorganism system as a whole. Proceedings in: EJP SOIL GM & Annual Science Days Annual Meeting - C2 Session "Soil biodiversity and ecosystem services", Riga, Latvia, 12-14 June 2023

Deng, C., Zou, Y. N., Hashem, A., Kuča, K., Abd-Allah, E. F., & Wu, Q. S. (2023). The visualized knowledge map and hot topic analysis of glomalin-related soil proteins in the carbon field based on Citespace. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 10(1), 48.

https://doi.org/10.1186/s40538-023-00428-1

15 RESPIRATION BASALE DU SOL - METHODE SITURESP®

DÉFINITION

La respiration basale du sol est un indicateur de l'activité des microorganismes du sol. Elle est basée sur une mesure d'émission de CO_2 du sol. La méthode SituResp® permet des mesures simples, rapides et et réalisables sur le terrain. SituResp® est une méthode principalement comparative utilisable en comparaison de deux systèmes au même moment, ou pour suivre l'évolution d'une même parcelle au cours du temps.

NORME

La méthode n'est pas normée, mais dérivée de la méthode MicroResp.

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Mesure réalisée sur sol frais tamisé à 5 mm. Peut être fait au champ.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

Le principe de la méthode est dérivé de la méthode de laboratoire MicroResp - Méthode Situresp® (https://www.microresp.com/protocol). Un gel contenant un indicateur coloré (Rouge de Crésol) est incubé dans le noir pendant 24 h en présence de sol frais. Le dégagement de CO_2 provoque une acidification du gel qui change la couleur du gel (du violet au jaune). Une lecture de l'absorbance à 570 nm à l'aide d'un spectrophotomètre de terrain permet de mesurer l'intensité du changement de couleur (Densité optique ou DO). Plus celui-ci est important plus l'activité des microorganismes est importante. Résultats = $DO_{T0} - DO_{T24}$

GAMME DE VARIATION

La gamme de variation est entre 0 (pas de respiration, gel de couleur rouge) et 1,5 (respiration très élevée, cuvette de couleur jaune clair)

INTERPRÉTATION

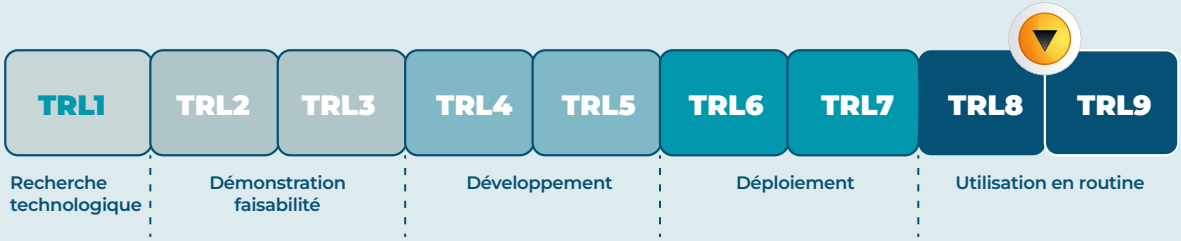
Plus le résultat est élevé, plus la respiration du sol est importante et vice versa. Une respiration basale importante est signe d'une activité microbiologique globale importante, soutenant potentiellement une activité importante du cycle du carbone et des nutriments.

AVANTAGES / LIMITES

Mesures simples, rapides, réalisables directement sur le terrain

C'est une mesure semi-quantitative, utilisée comme proxi de la respiration basale. Aucune mesure directe de flux de CO_2 n'est réalisée. Cette mesure fait partie des indicateurs adaptés et conçus pour les analyses comparatives in situ des pratiques. En revanche elle ne se prête pas ou peu à une analyse individuelle au vu de l'absence de base de donnée et de sa dépendance aux conditions pédoclimatiques (humidité notamment).

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- Prix consommable environ 1 €

SOURCES

Thoumazeau, A., Gay, F., Alonso, P., Suvannang, N., Phongjinda, A., Panklang, P., Chevallier, T., Bessou, C., Brauman, A., 2017. SituResp®: A time- and cost-effective method to assess basal soil respiration in the field. Applied Soil Ecology 121, 223–230. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.006

16 AZOTE POTENTIELLEMENT MINERALISABLE (APM)

NUTRIMENTS

DÉFINITION

L'APM correspond à la fraction de l'azote organique du sol facilement minéralisable par les microorganismes.
Il est obtenu en mesurant l'azote ammoniacal libéré par une extraction chimique à chaud.
Il est exprimé en mg/kg de terre ou en % d'azote total.

NORME

Pas de norme. La méthode est adaptée de Gianello et Bremner (1986).

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol sec

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

La méthode se base sur une double extraction chimique de l'azote ammoniacal (distillation Kjeldahl). La première extraction est réalisée avec une solution tampon de phosphate de borate (BO7P), tandis que la seconde se fait avec du chlorure de potassium (KCl). La différence entre les résultats de ces deux extractions permet de calculer la quantité d'APM.

L'analyse s'effectue sur 2 sous-échantillons de 4 g tamisés à 2 mm et séchés. Les extractions s'effectuent par distillation directe à chaud (5 minutes pour l'extraction dans la solution tampon de phosphate borate, 3 minutes dans la solution de KCl).

GAMME DE VARIATION

Données du réseau des coopératives InVivo / Communication aux Rencontres du Comifer-GEMAS en 2013 :

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation du sol	Nb obs.	Min	Max	Médiane
APM	mg/kg de terre	Grandes cultures	35	5	70	19
	% de l'N total			0,7	2,5	1,5

INTERPRÉTATION

L'APM est un indicateur du potentiel de minéralisation du sol, c'est-à-dire de sa fourniture en azote disponible pour la plante, indépendamment des apports externes. Il peut donc être corrélé à la vitesse de minéralisation (kgN/ha/jour normalisé) dans le bilan azoté (voir le paragraphe « Niveau d'opérationnalité »).

Il est principalement dépendant du type de sol, mais également des pratiques historiques d'apports organiques.

AVANTAGES / LIMITES

La technique d'analyse appliquée (extraction chimique) est moins longue et coûteuse que l'incubation à 28°C pendant 28 jours. Le travail sur échantillon séché présente également un avantage opérationnel et logistique.

Il s'agit d'un indicateur représentatif du fonctionnement d'un sol, qui reste stable sur plusieurs années dans les situations où les pratiques sont inchangées, mais qui peut présenter une forte variabilité au sein des parcelles d'une même exploitation. Il permet de préciser l'estimation des fournitures du sol dans le cadre d'une méthode de bilan, et donc d'ajuster au mieux le conseil en azote.

L'indicateur ne fait cependant pas l'objet d'une normalisation à ce jour, même si des travaux sont en cours.

16 AZOTE POTENTIELLEMENT MINERALISABLE (APM)

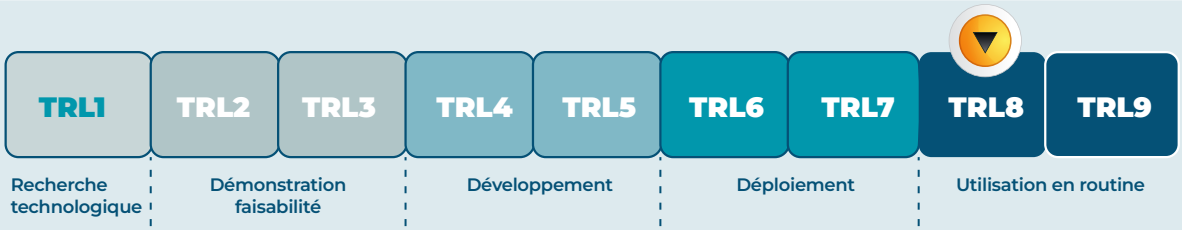
AUTRES MÉTHODES D'ESTIMATION DU POTENTIEL DE MINÉRALISATION

D'autres méthodes existent pour approcher la fraction d'azote minéralisable à court terme (cycle cultural) : le potentiel de minéralisation de l'azote organique et l'Azote Biologiquement Minéralisable (ABM) (se référer à leur fiche pour plus d'informations). Le tableau ci-dessous permet de comparer leur niveau d'opérationnalité :

	Méthode	Norme	Préparation	Simplicité	Rapidité	Coût	Référencement
N minéralisé 28 J	Incubation aérobie 28 jours 28°C	XP U44-163 et NF ISO 14238	Sol brut tamisé 5 mm	- -	⌛⌛⌛⌛	€€€€	*Méthode de référence en France (Bouthier et al, 2015 ; Déplanche, 2021)*
APM (Azote Potentiellement Minéralisable)	Double distillation Kjeldahl partielle (KCl et tampon phosphate borate)	Non (Gianello et Bremner, 1986)	Sol séché tamisé 2 mm	-	⌛⌛	€€	*Travaux d'In Vivo (Rocca et al, 2013), Réseau Mh / Sol-AID (http://geowww.agrocampus-ouest.fr/web/?page_id=2804)*
ABM (Azote Biologiquement Minéralisable)	Incubation anaérobie 7 jours 40°C	Non (Keeney & Bremner,1966 ; Schomberg et al., 2009)	Sol brut tamisé 5 mm	+ +	⌛⌛	€€	*Etudes internationales (Clark, 2018 ; Curtin et al, 2017 ; Orcellet et al 2016), réseau Mh, Microbioterre*

Ces trois méthodes ont chacune leurs avantages et inconvénients. Le choix de la méthode se fera donc selon le contexte et les objectifs de l'analyse. Par exemple, le potentiel par incubation sera plus pertinent en expérimentation. L'APM se justifiera pour le paramétrage des logiciels de plan de fumure utilisant cet indicateur. L'ABM donnera une indication sur l'activité biologique de minéralisation et, combiné à d'autres indicateurs, permettra d'orienter le choix de pratiques culturales.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 50 à 70 € / échantillon
- Utilisable en situation de conseil, à condition de disposer d'un modèle d'interprétation permettant de l'intégrer dans le bilan.

A ce jour, les outils suivants utilisent l'APM dans le cadre d'un conseil azote : Epiclès, WiUz, Sol-AID.

SOURCES

Bouthier A, Trochard R, Valé M, Chaussod R, Nouaïm R (2015). Valoriser les indicateurs microbiologiques en grandes cultures et polyculture élevage. 12e Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre (GEMAS COMIFER, Lyon, 18-19 novembre 2015).

Clark J (2018). Improving Nitrogen Management With The Anaerobic Potentially Mineralizable Nitrogen Test. University Digital Conservancy. https://hdl.handle.net/11299/199092

Curtin D, Beare M H, Lehto K, Tregurtha C, Qiu W, Tregurtha R, Peterson M (2017). Rapid assays to predict nitrogen mineralization capacity of agricultural soils. Soil Science Society of America Journal, 81(4), 979–991. https://doi.org/10.2136/sssaj2016.08.0265

Deplanche T (2021). 25 ans d'analyses biologiques de sol… et une méthode d'interprétation. 15e Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre (GEMAS COMIFER, Reims, 24-25 novembre 2021).

Gianello C, Bremner J M (1986). Comparison of chemical methods of assessing potentially available organic nitrogen in soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 17, 215–236. https://doi.org/10.1080/00103628609367709

Keeney D R, Bremner J M (1966). Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. Agronomy Journal, 58(5), 498–503. https://doi.org/10.2134/agronj1966.00021962005800050013x

Orcellet J, Reussi Calvo N I, Sainz Rozas H R, Wyngaard N, Echeverría H E (2017). Anaerobically incubated nitrogen improved nitrogen diagnosis in corn. Agronomy Journal, 109(1), 291–298. https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0115

Rocca C, Varvoux L, Aumond C, Servonnat E, Regnier J M, Bernard C, Raynaud B, Darbin T (2013). La mesure d'Azote Potentiellement Minéralisable (APM) : un indicateur pour préciser le poste minéralisation du sol. 11e Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre (GEMAS COMIFER, Poitiers, 20-21 novembre 2013).

Schomberg H H, Wietholter S, Griffin T S, Reeves D W, Cabrera M L, Fisher D S, Endale D M, Novak J M, Balkcom K S, Raper R L, Kitchen N R, Locke M A, Potter K N, Schwartz R C, Truman C C, Tyler D D (2009). Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under different management systems. Soil Science Society of America Journal, 73(5), 1575–1586. https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0303

17 AZOTE BIOLOGIQUEMENT MINERALISABLE (ABM)

DÉFINITION

L'ABM représente la fraction de l'azote organique du sol facilement minéralisable par les microorganismes. La méthode repose sur l'incubation d'un échantillon de sol brut en conditions contrôlées (incubation dans un milieu liquide anaérobie pendant 7 jours à 40°C). Les conditions anaérobies bloquant la nitrification, la minéralisation se mesure en suivant l'évolution de l'azote ammoniacal dans le sol.

Cet indicateur est comparable au potentiel de minéralisation aérobie 28 jours à 28°C, mais sa mise en œuvre est plus rapide et moins coûteuse.

NORME

Pas de norme. Méthode adaptée de Keeney et Bremner (1966), reprise par Schomberg et al. (2009).

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'échantillon de sol brut tamisé à 2 mm est mis en incubation anaérobie (milieu liquide) pendant 7 jours à 40°C.

L'extraction est réalisée avec une solution de KCl 1M, et le dosage de N-NH4 par colorimétrie en flux continu.

L'ABM est obtenu par différence entre les teneurs ammoniacales en fin et en début d'incubation. Les résultats sont exprimés en mg d'azote minéralisable/kg de sol et en % d'azote total.

GAMME DE VARIATION

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : Grandes cultures (n = 600 obs, source interne Auréa AgroSciences + Microbioterre + Agro-Eco Sol) profondeur : 0-20 cm		
		Min	Max	Médiane
ABM	mg/kg	3	95	17
	%N tot	0,4	4,5	1,6

Indicateur	Unité de mesure	Mode d'occupation des sols : Viticulture (n = 32 obs., source projet OAD MO)		
		Min	Max	Médiane
ABM	mg/kg	3	48	16
	%N tot	0,4	2.6	1,6

INTERPRÉTATION

L'ABM est un indicateur de l'activité biologique potentielle de transformation de l'azote organique du sol et il traduit un potentiel de fourniture en azote minéral. Une valeur élevée aura pour conséquences potentielles une fourniture en azote élevée et des pertes d'azote par volatilisation de l'azote apporté élevées.

Les pratiques augmentant le stock d'azote organique du sol et stimulant l'activité des microorganismes (apport de matières fertilisantes organiques principalement, et interculture dans une moindre mesure) favorisent la minéralisation de l'azote organique ce qui se traduit par des valeurs d'ABM plus élevées.

AVANTAGES / LIMITES

L'analyse est rapide et moins coûteuse que le potentiel de minéralisation 28 jours à 28°C.

L'ABM renseigne pour le moment seulement sur un potentiel de fourniture en azote. Cet indicateur n'est en effet pas encore utilisable pour améliorer l'estimation de la fourniture en azote par le sol dans le cadre du bilan azoté.

Elle est réalisée sur un échantillon de sol frais, ce qui entraîne des contraintes dans la période de prélèvement et un envoi rapide au laboratoire.

17 AZOTE BIOLOGIQUEMENT MINERALISABLE (ABM)

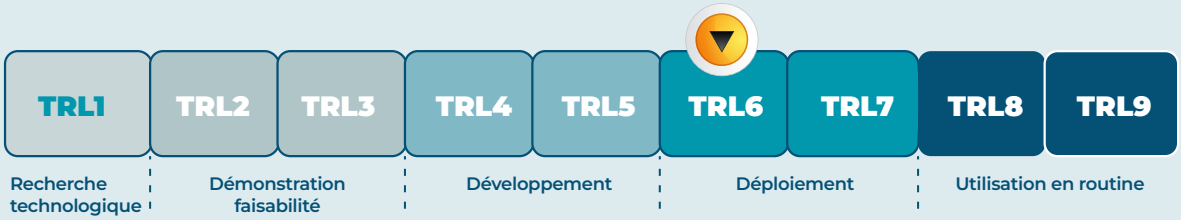
AUTRES MÉTHODES D'ESTIMATION DU POTENTIEL DE MINÉRALISATION

D'autres méthodes existent pour approcher la fraction d'azote minéralisable à court terme (cycle cultural) : le potentiel de minéralisation de l'azote organique et l'Azote Potentiellement Minéralisable (APM) (se référer à leur fiche pour plus d'informations). Le tableau ci-dessous permet de comparer leur niveau d'opérationnalité :

	Méthode	Norme	Préparation	Simplicité	Rapidité	Coût	Référencement
N minéralisé 28 J	Incubation aérobie 28 jours 28°C	XP U44-163 et NF ISO 14238	Sol brut tamisé 5 mm	- -	⌛⌛⌛⌛	€€€€	*Méthode de référence en France (Bouthier et al, 2015 ; Déplanche, 2021)*
APM (Azote Potentiellement Minéralisable)	Double distillation Kjeldahl partielle (KCl et tampon phosphate borate)	Non (Gianello et Bremner, 1986)	Sol séché tamisé 2 mm	-	⌛⌛	€€	*Travaux d'In Vivo (Rocca et al, 2013), Réseau Mh / Sol-AID (http://geowww.agrocampus-ouest.fr/web/?page_id=2804)*
ABM (Azote Biologiquement Minéralisable)	Incubation anaérobie 7 jours 40°C	Non (Keeney & Bremner,1966 ; Schomberg et al., 2009)	Sol brut tamisé 5 mm	++	⌛⌛	€€	*Etudes internationales (Clark, 2018 ; Curtin et al, 2017 ; Orcellet et al 2016), réseau Mh, Microbioterre*

Ces trois méthodes ont chacune leurs avantages et inconvénients. Le choix de la méthode se fera donc selon le contexte et les objectifs de l'analyse. Par exemple, le potentiel par incubation sera plus pertinent en expérimentation. L'APM se justifiera pour le paramétrage des logiciels de plan de fumure utilisant cet indicateur. L'ABM donnera une indication sur l'activité biologique de minéralisation et, combiné à d'autres indicateurs, permettra d'orienter le choix de pratiques culturales.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- Entre 70 et 100 € (avec l'azote total et l'humidité)

SOURCES

Perrin A.-S., Tscheiller R., Riah-Anglet W., Cusset E., Valé M., et al. Microbioterre : référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des apports de matières organiques au champ. Innovations Agronomiques, 2023, 88, pp.15-30.

KEENEY, D. R. et BREMNER, J. M. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability 1. Agronomy journal, 1966, vol. 58, no 5, p. 498-503.

SCHOMBERG, Harry H., WIETHOLTER, Sirio, GRIFFIN, Timothy S., et al. Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under different management systems. Soil Science Society of America Journal, 2009, vol. 73, no 5, p. 1575-1586.

18 ACTIVITE MESO-BIOLOGIQUE DU SOL : MESURE IN SITU PAR LA METHODE BAIT LAMINA

DÉFINITION

Les lamina baits (bandelettes semi-rigides) font partie des indicateurs comme le tea bag index ou les sacs à litières (litter bags) dédiés à la mesure de l'activité alimentaire de la faune du sol. Les lamina baits ciblent principalement la mésofaune et petite macrofaune du sol (vers de terre, fourmis, etc..) Leurs activités alimentaires sont évaluées à travers la vitesse de consommation d'un appât organique durant une période d'incubation dans le sol.

NORME

ISO 18311:2016 : Qualité du sol - Méthode pour tester les effets des contaminants du sol sur l'activité alimentaire des organismes vivant dans le sol - Test Bait-lamina

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Mesure *in situ*

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

Le principe de la méthode consiste en un dénombrement des trous ayant subi une dégradation visible du substrat organique après la période d'incubation dans le sol. Un score est attribué pour chaque trou de lamina, selon la modalité décrite ci-dessous :

Etat de dégradation	Pas de dégradation	Dégradation partielle	Dégradation totale	Présence de sol à la place du substrat
$Score_{Holei}$	0	0.5	1	1

Résultats = [(somme des scores / nombre de trous) /durée d'incubation] *100

GAMME DE VARIATION

Minimum : aucun trou dégradé
Maximum : 100 % des trous dégradés
Pas de base de données existante, méthode utilisée en analyse comparative

INTERPRÉTATION

- Faible pourcentage de dégradation : Indique une faible activité biologique ou une toxicité élevée du milieu.
- Fort pourcentage de dégradation : Signe une bonne activité des organismes du sol ou un faible impact toxique.

AVANTAGES / LIMITES

Méthode simple et peu coûteuse, standardisée, applicable sur tout type de sols, intégrative (mesure l'effet global de la méso-macrofaune) et applicable in situ en conditions réelles.

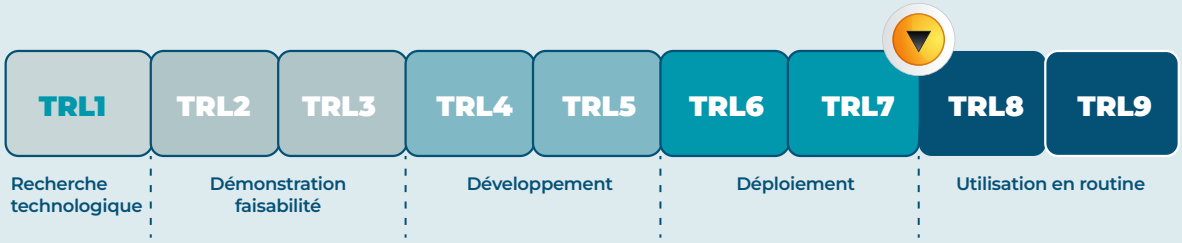
Test qui dépend fortement des conditions pédoclimatiques. Les périodes optimales pour l'activité biologique dans le sol en France sont le printemps et l'automne (humidité et chaleur) et la saison des pluies en milieu tropical.

C'est une mesure quantitative, utilisée comme proxi de l'activité biologique mais ce n'est pas une mesure de la densité ou de biodiversité de la faune du sol.

C'est une méthode de terrain dépendante des conditions d'échantillonnage, ce qui est une limite pour la construction d'un référentiel. Cependant une base de données est en construction dans le cadre de l'outil Biofunctool.

18 ACTIVITE MESO-BIOLOGIQUE DU SOL MESURE IN SITU PAR LA METHODE BAIT LAMINA

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- Environ 2 € par lamina

SOURCES

Von Törne, E., 1990. Assessing feeding activities of soil-living animals. I. Bait-lamina-tests. Pedobiologia 34, 89–101.

Protocole complet incluant la composition et fabrication du substrat de remplissage (https://www.biofunctool.com/documentation/protocols)

19 LES NEMATODES DU SOL

DÉFINITION

Les nématodes du sol sont des vers microscopiques (de l'ordre d'1 mm de longueur). Le terme nématofaune définit la communauté des espèces de nématodes vivant dans le sol. Ces nématodes sont reconnus comme étant des indicateurs pertinents de la qualité/santé des sols ; en effet ayant des régimes alimentaires différents, ils donnent des informations sur la structure de la microchaîne trophique du sol en lien avec son fonctionnement biologique. De plus, ces organismes présentent une grande diversité taxonomique et de caractéristiques biologiques, et chacun réagit différemment aux pressions environnementales, les rendant sensibles à une large gamme de pressions (d'origines physiques, chimiques, climatiques, pollution…) et ces variations sont pour une large part documentées.

NORME

Le prélèvement, l'extraction et l'identification des nématodes sont encadrés par une norme ISO (ISO 23611-4, 2011. Soil quality- Sampling soil invertebrates, Part 4: sampling, extraction, identification of soil nematodes).

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

Il existe plusieurs méthodologies d'extraction des nématodes du sol. A l'échelle mondiale, la méthode de Baermann-funnel method est la plus utilisée. L'élutriation[1] par la méthode d'Oostenbrick est la méthode référencée dans la norme ISO 23611-41, elle est également très utilisée, notamment par les laboratoires d'analyses privés car elle permet d'extraire plus de sol et donne des résultats plus stables. Elle est toutefois onéreuse (achat des élutriateurs) ; a contrario d'autres méthodes basées sur le même principe, comme l'assiette d'Oostenbrink (méthode de Baermann modifiée), peuvent être une alternative au regard de la facilité de mise en œuvre et du coût. Une fois extraits, les nématodes sont dénombrés à la loupe binoculaire et identifiés au niveau du genre ou de la famille sur une base morphologique au microscope droit (x 400).

GAMME DE VARIATION

Dans le cadre de l'étude INDIQUASOL « Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs » expertise scientifique collective coordonnée par INRAE (2024), ELISOL Environnement a produit et partagé un tableau de références à partir des données de situations naturelles et agricoles issues de sa base de données ELIPTO[2] ; ces références incluent des données publiées dans des revues scientifiques.

Occupations du sol		Surfaces boisées	Cultures annuelles	Surfaces en herbe	Vignes et vergers	Toutes occupations (France métropolitaine)	Références
Nombre		483	3367	1215	1111	6176	*ELIPTO (base de données d'ELISOL environnement) dont données incluses dans les publications suivantes : Cluzeau et al. 2012; Coll et al. 2013; Coll et al. 2012; Garcin et al. 2014; Henneron et al. 2014; Kondratow et al. 2019; Le Guedard et al. 2016; Salomé et al. 2016; Salome et al. 2014; Sauvadet et al. 2016; Sun et al. 2023; Van den Hoogen et al. 2019; van den Hoogen et al., 2020; Villenave, 2012. ; Villenave et al. 2018; Villenave et al 2013b; Villenave et al. 2011.*
Nématodes totaux (ind . g^{-1} sol sec)	Min.	0.24	0.05	0.00	0.06	0.00	
	Max.	132	113	149	256	256	
	Moyenne	**14.0**	**16.6**	**18.1**	**11.4**	**15.8**	
Nématodes libres (ind . g^{-1} sol sec)	Min.	0.13	0.00	0.00	0.01	0.00	
	Max.	109	97	129	254	254	
	Moyenne	**6.5**	**8.9**	**8.9**	**6.1**	**8.2**	
Nématodes phytophages (ind . g^{-1} sol sec)	Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Max.	53	62	56	58	62	
	Moyenne	**7.5**	**7.7**	**9.2**	**5.3**	**7.6**	
Indice d'enrichissement (sans unité)	Min.	2	2	0	0	0	
	Max.	100	100	100	99	100	
	Moyenne	**51**	**64**	**58**	**53**	**60**	
Indice de structure (sans unité)	Min.	0	0	0	0	0	
	Max.	100	98	98	100	100	
	Moyenne	**63**	**43**	**44**	**46**	**45**	
Indice de diversité de Shannon (sans unité)	Min.	0.48	0.19	0.00	0.21	0.00	
	Max.	2.84	2.69	2.78	2.63	2.84	
	Moyenne	**1.86**	**1.91**	**1.81**	**1.98**	**1.90**	

1 Elle repose sur un courant d'eau ascendant constant qui empêche la sédimentation des nématodes. Ensuite, le surnageant contenant les nématodes est passé au travers d'un tamis pour les récupérer

GAMME DE VARIATION (SUITE)

Interprétation des Indices Nématodes

(d'après le rapport ADEME (2017) les bio-indicateurs de l'état du sol en sites et sols pollués, principe et exemple d'utilisation)

Etat biologique	Satisfaisant	Intermédiaire	Dégradé
	Aucune préconisation	Mise en place d'une surveillance	Mise en place d'une mesure de gestion
Abondance des nématodes phytophages	Dépend de l'occupation du sol (végétation du site étudié): interprétation réalisée en utilisant l'outil d'aide à la décision (OAD) développé par ELISOL		<200 nématodes / 100g sol
Abondance des nématodes micro-bivores (bacterivores + fongivores)			<200 nématodes / 100g sol
Abondance des nématodes omnivores et prédateurs			<200 nématodes / 100g sol
Indice de Structure (SI)	>50	20 à 50	et <20

Ce type d'analyse ne convient pas dans le cadre de diagnostic d'accident de culture en lien avec des nématodes phytophages.

INTERPRÉTATION

A partir des tableaux d'abondances des différents groupes fonctionnels (nématodes libres : bactérivores, fongivores, omni-prédateurs et nématodes phytophages) sont élaborés des indices écologiques (Indice de Structure, Indice d'Enrichissement, Indice de diversité de Shannon…) reflétant le fonctionnement biologique du sol. Cette analyse reflète l'état de fonctionnement biologique global du sol, les nématodes étant présents dans différentes strates de la chaîne trophique.

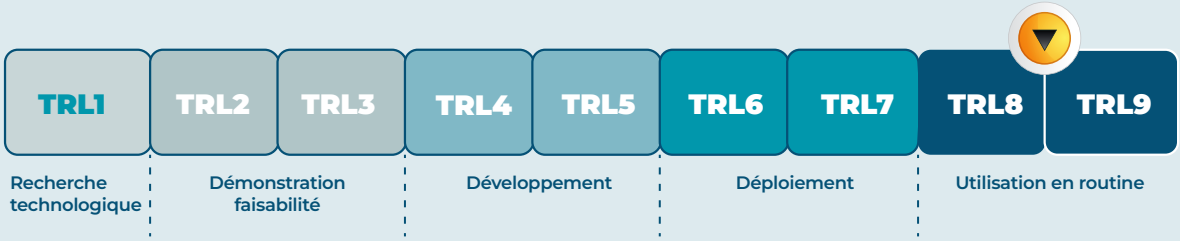
Dans le cadre de sols perturbés, on s'intéresse particulièrement à l'indice de structure (SI), qui reflète la stabilité du milieu : plus il est élevé, moins le milieu est perturbé. Par ailleurs, plus les abondances des différents groupes fonctionnels de nématodes libres sont élevées, plus l'activité biologique du sol est importante et satisfaisante. Les méthodes de calcul de ces indicateurs sont publiées (ex : Ferris & Bongers 2001).

AVANTAGES / LIMITES

L'analyse requière une faible quantité de sol (300 à 500 g) ; le prélèvement est simple, rapide et peut être réalisé sur tout type de sol. La quantification de l'abondance des nématodes peut se faire avec une loupe binoculaire et une extraction simple peu onéreuse (ex assiette d'Oostenbrink). Parmi les indicateurs biologiques, l'analyse de la nématofaune est un indicateur riche et permet un niveau d'information plus complet sur le fonctionnement biologique.

Si on veut un diagnostic complet de la qualité biologique, il faut passer par un laboratoire spécialisé dont le coût d'analyse peut être important.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- Entre 100 et 265 € l'analyse et l'interprétation des données de la nématofaune d'un échantillon de sol représentatif d'une parcelle
- Utilisable en situation de conseil

2 ELISOL environnement a développé une base de données unique d'analyses de la nématofaune des sols (ELIPTO©, SIE Système d'Information Environnemental), à vocation bio-indication et à vocation phytoprotection, qui a pour objectif de centraliser l'ensemble des données de la littérature ainsi que des analyses propres au laboratoire. En 2025 cette base de données contient plus de 10 000 analyses.

SOURCES

ADEME, ADERA-LEB Aquitaine Transfert, ELISOL, Mines Saint-Etienne, EODD Ingénieurs Conseils. 2017. APPOLINE : Applicabilité à l'étude des sites pollués du biomarqueur lipidique des végétaux et du bio-indicateur nématofaune, 187 pages Auteur(s) : Marina Le Guédard (ADERA-LEB Aquitaine Transfert), Cécile Villenave (ELISOL), Olivier Faure (Mines Saint-Etienne), Jean- François Nau (EODD Ingénieurs Conseils), Benjamin Pauget (Tesora), Guénola Péres (Agrocampus Ouest)

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

Ferris, H., Bongers, T., & de Goede, R. (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. Appl Soil Ecol, 18(1), 13-29.

RÉFÉRENCES UTILISÉES POUR LE RÉFÉRENTIEL

Cluzeau, D., Guernion, M., Chaussod, R., Martin-Laurent, F., Villenave, C., Cortet, J., Ruiz-Camacho, N., Pernin, C., Mateille, T., Philippot, L., Bellido, A., Rougé, L., Arrouays, D., Bispo, A., Pérès, G. 2012 .Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. European Journal of Soil Biology 49, 63-72. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.003

Coll, P., Le Cadre, E., Blanchart, E., Hinsinger, P., Villenave, C. 2011. Organic viticulture and soil quality: A long-term study in Southern France. Applied Soil Ecology 50, 37-44. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.013

Coll, P., Le Cadre, E., Villenave, C. 2012 .How are nematode communities affected during a conversion from conventional to organic farming in southern French vineyards? Nematology 14, 665-676. https://doi.org/10.1163/156854112X624195

Garcin, A., Millan, M., Jay, M., Loquet, B., Brachet, M.-L., N., M., Villenave, C., Masquelier, S. 2014 L'abricotier en agriculture biologique : vers un verger écologiquement intensif et autonome en intrants ? Info CTIFL 301, 38-49.

Henneron, L., Bernard, L., Hedde, M., Pélosi, C., Villenave, C., Chenu, C., Bertrand, M., Girardin, C., Blanchart, E. 2014. Fourteen years evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. Agronomy for sustainable development 35, 169-181. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0215-8C

Kondratow, F., Chauvin, C., Villenave, C., Andrieu, E., Brin, A. 2019. Nematode communities after the reintroduction of silver fir in beech dominated forests. European Journal of Forest Research 138, 957-965. https://doi.org/10.1007/s10342-019-01216-z

Le Guedard, M., Bessoule, J.-J., Cérémonie, H., Faure, A., Fayolle, G., Nau, J.-F., Villenave, C. 2016 Applicabilité à l'étude des sites pollués du biomarqueur lipidique des végétaux et du bioindicateur nématofaune. ADEME: 181.

Salomé, C., Coll, P., Lardo, E., Metay, A., Villenave, C., Marsden, C., Blanchart, E., Hinsinger, O., Le Cadre, E. 2016 . The soil quality concept as a framework to assess management practices in vulnerable agroecosystems: A case study in Mediterranean vineyards. Ecologic indicators 61, 456–465. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.047

Salome, C., Coll, P., Lardo, E., Villenave, C., Blanchart, E., Hinsinger, P., Marsden, C., Le Cadre, E. 2014 Relevance of use-invariant soil properties to assess soil quality of vulnerable ecosystems: The case of Mediterranean vineyards. Ecological Indicators. 43, 83-93. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.016

Sauvadet, M., Chauvat, M., Cluzeau, D., Maron, P.A., Villenave, C., Bertrand, I. 2016. The dynamics of soil micro-food web structure and functions vary according to litter quality. Soil Biology & Biochemistry 95, 262-274. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.016

Sun, F., Coulibaly, S.F.M., Cheviron, N., Mougin, C., Hedde, M., Maron, P.-A., Recous, S., Trap, J., Villenave, C., Chauvat, M. 2023. The multi-year effect of different agroecological practices on soil nematodes and soil respiration. Plant Soil, 1–16.

Van den Hoogen, J., Geisen, S., Routh, D., Ferris, H., Traunspurger, W., Wardle, D.A., De Goede, R.G.N., Adams, B.J., Ahmad, W., Andriuzzi, W.S., Bardgett, R.D., Bonkowski, M., Herrera, R.C., Cares, J.E., Caruso, T., Brito Caixeta, L., Chen, X., Costa, S.R., Creamer, ……..…, Villenave, C., Waeyenberge, L., Wall, D.H., Wilschut, R., Wright, D.G., In Yang, J., Ward Crowther, T. 2019 . Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. Nature 572, 194-198. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1418-6

van den Hoogen, J., Geisen, S., Wall, D.H., Wardle, D.A., Traunspurger, W., de Goede, R.G.M., Adams, B.J., Ahmad, W., Ferris, H., Bardgett, R.D., Bonkowski, M., Campos-Herrera, R., Cares, J.E., Caruso, T., Caixeta, L.D., Chen, X.Y., Costa, S.R., Creamer, R., ……..…, Villenave, C., Waeyenberge, L., Wilschut, R.A., Wright, D.G., Keith, A.M., Yang, J.I., Schmidt, O., Bouharroud, R., Ferji, Z., van der Putten, W.H., Routh, D., Crowther, T.W. 2020. A global database of soil nematode abundance and functional group composition [Data paper]. Scientific Data 7, 8. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0437-3

Villenave, C. 2012. Analyse de la nématofaune comme bioindicateur de l'état du sol. Rapport final du Projet Bioindicateur ADEME.

Villenave, C., Chauvin, C., Santune, C., Cérémonie, H., Schneider, A. 2018. L'effet des légumineuses sur le fonctionnement biologique du sol : une méta-analyse sur la nématofaune du sol. Innovations Agronomiques 69, 47-60.

Villenave, C., Jimenez, A., Guernion, M., Pérès, G., Cluzeau, D., Mateille, T., Martiny, B., Fargette, M., Tavoillot, J. 2013. Nematodes for soil quality monitoring: results from the RMQS BioDiv programme. Open Journal of Soil Science 3, 30-45. https://doi.org/10.4236/ojss.2013.31005

Villenave, C., Saj, S., Attard, E., Klumpp, K., Le Roux, X. 2011 .Grassland management history affects the response of nematode community to changes in aboveground grazing regime. Nematology, 995-1008. https://doi.org/10.1163/138855411X574558

20 VERS DE TERRE

DÉFINITION

Les vers de terre sont des organismes du sol appartenant à la macrofaune. Classés en trois catégories écologiques (épigés, anéciques, endogés) selon leur morphologie et leur comportement, ils exercent des fonctions variées dans le sol : création de galeries, production de déjections et dégradation de la matière organique. Ils font partie des indicateurs biologiques les plus couramment utilisés parmi la faune du sol. Ils peuvent être étudiés au travers de :
- leur abondance et de leur biomasse totale : nombre d'individus et biomasse par unité de surface.
- leur diversité : proportion des groupes écologiques, nombre d'espèces et liste des espèces identifiées.

NORME

Le prélèvement des vers de terre est encadré par la norme ISO 23611-1:2018 (FR) : Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 1: Tri manuel et extraction des vers de terre

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Pour un échantillonnage efficace, il est crucial de tenir compte des conditions météorologiques, de la saisonnalité et des pratiques culturales. Les périodes optimales pour le dénombrement des vers de terre en France sont le printemps et l'automne. Il est conseillé de réaliser 4 à 5 répétitions par parcelle ou site d'étude et d'éviter de rééchantillonner au même emplacement après perturbation du sol. Deux méthodes de prélèvement sont principalement utilisées :

• Extraction chimique : cette méthode non destructive consiste à appliquer une solution de moutarde dans une zone définie du sol pour provoquer la remontée des vers à la surface, facilitant ainsi leur collecte. La méthode n'est pas encadrée par une norme ISO. https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php

• Tri manuel : cette méthode (test bêche) consiste à prélever à l'aide d'une bêche un volume de sol (25 cm × 25 cm × 25 cm) et à récupérer de façon manuelle les vers de terre présents. La méthode est encadrée par la norme ISO 23611-1:2018. https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php

L'efficacité de l'extraction des vers de terre varie selon la méthode utilisée, avec des recommandations spécifiques pour l'échantillonnage en fonction des conditions météorologiques. Les vers de terre extraits sont lavés dans de l'eau puis conservés dans de l'alcool pour une éventuelle identification ultérieure.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'ensemble des individus prélevés est dénombré (abondance) et pesé (biomasse). Ils sont ensuite identifiés (groupe écologique, genre et espèce) sous loupe binoculaire à partir d'une clé de détermination sur la base de critères morphologiques (exemples : Bouché, 1972 ; Qiu et Bouché, 1998 ; Czusdi et Zicsi, 2003). L'identification peut s'arrêter au groupe écologique et être réalisée sur le terrain. L'identification se fait seulement sur les individus adultes (les juvéniles ne peuvent pas être identifiés mais sont seulement dénombrés et pesés).

GAMME DE VARIATION

Indicateurs	Unité de mesure	Usage non différencié (n=109)			Prairie (n=47)			Culture (n=52)			Forêt (n=8)		
		Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
Abondance des vers de terre	Nombre d'individus par m² (vers/m²)	3	260	1333	32	350	1332	3	215	691	9	50	122
Diversité des vers de terre	Nombre d'espèces	1	8	13		9.6			7.4				

Source : Etude IndiQualSol, Cousin et al., 2024.

20 VERS DE TERRE

INTERPRÉTATION

L'interprétation peut se faire à différents niveaux :

- L'abondance et la biomasse des individus renseignent sur la qualité de l'habitat et l'accessibilité aux ressources (la réduction de travail du sol et l'apport de produits organiques sont reconnus par exemple pour favoriser l'abondance et la biomasse des vers de terre) ;
- La proportion des groupes écologiques renseigne sur le potentiel fonctionnel assuré par les vers de terre. Chaque groupe étant impliqué dans des fonctions précises :
  > les vers de terre épigés (petits vers en surface) sont impliqués dans la décomposition de la matière organique ;
  > les vers de terre endogés (de taille moyenne, vivant dans la couche arable) contribuent à la structuration du sol et à la circulation de l'air et de l'eau ;
  > les vers de terre anéciques (grands, creusant des galeries verticales) jouent un rôle essentiel dans l'aération, dans l'infiltration de l'eau et dans l'incorporation des matières organiques dans le sol.

La diversité taxonomique permet d'affiner le diagnostic fonctionnel issu des groupes écologiques, chaque espèce ayant des caractéristiques propres.

AVANTAGES / LIMITES

Indicateur sensible aux pratiques agricoles, relié aux principales fonctions du sol : dégradation des matières organiques, structuration, agrégation et infiltration de l'eau.

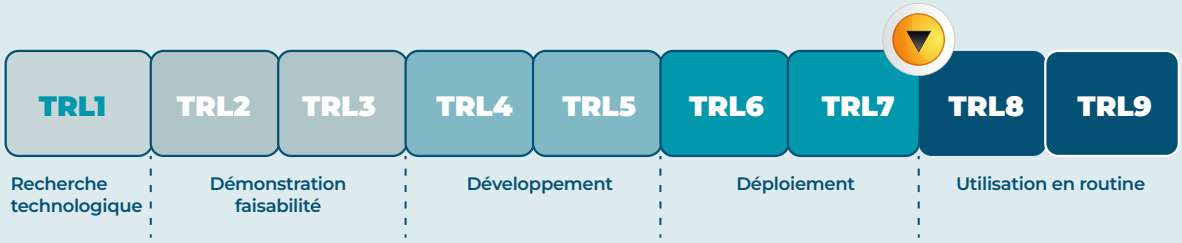
Méthodes d'échantillonnage relativement simples et accessibles (peuvent être mises en œuvre sans compétences spécifiques),

Indicateur pédagogique : des premiers résultats peuvent être disponibles directement sur le terrain.

Les vers de terre étant sensibles aux conditions climatiques, la période optimale de prélèvement peut être courte (si les sols sont secs ou gorgés d'eau et/ou les températures trop froides ou chaudes, les vers de terre ne seront pas présents en surface donc non échantillonnables).

Les individus juvéniles représentant souvent une part importante des individus prélevés (en nombre), la diversité taxonomique mesurée pourrait ne pas représenter la diversité réelle (l'identification se faisant seulement sur les individus adultes).

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



• 20 à 50 € (abondance totale seule), 150 € (abondance + diversité), auxquels il faut rajouter 120 à 150 € pour la prestation de prélèvement si besoin.

SOURCES

OPVT, 2015 - Clé d'identification de lombriciens en 4 groupes fonctionnels. Université de Rennes 1/CNRS - OSUR - UMR Ecobio [Disponible en ligne : https://www.observatoire-agricole-biodiversite.fr/upload/attachment/6092af929baea533469041.pdf]

Guernion M., Hoeffner K., Guillocheau S., Hotte H., Cylly D., Vourc'h Y., ... & Cluzeau, D., 2016. When citizens and scientists work together: A French collaborative science network on earthworms communities (the OPVT).

Bouché Marcel, Les lombriciens de France : Ecologie et systématique, 1972.

Qiu J-P, Bouche MB (1998) La decouverte de Postandrilus ge. Nov. (Oligochaeta: Lumbricidae) et remarques sur la reproduction des lombriciens. Doc pedozoologiq integrologiq 4:65–72

Czusdi, C. & Zicsi, A. Earthworms of Hungary (Annelida, Oligochaeta, Lumbricidae). (Hungarian Natural History Museum, 2003)

21 DIVERSITE BACTERIENNE

DÉFINITION

La diversité bactérienne désigne la structure des communautés bactériennes d'un sol, en tenant compte à la fois de la richesse taxonomique et de l'abondance relative de chacun des groupes de ces communautés.
Par approche de métabarcoding, cette diversité est estimée à partir d'OTUs (Unités Taxonomiques Opérationnelles), soit le regroupement d'organismes présentant une séquence d'ADN similaire pour le gène cible (ADNr 16S) ; ou d'ASVs (Amplicon Sequence Variants). La diversité exprimée en ASVs permet une résolution plus fine, par la distinction des séquences uniques sans regroupement préalable.

NORME

NF EN ISO 11063 : Qualité du sol - Extraction directe de l'ADN du sol

ISO 17601 : Qualité du sol - Estimation de l'abondance de séquences de gènes microbiens par amplification par réaction de polymérisation en chaîne (PCR)

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'ADN total des microorganismes est d'abord extrait puis purifié. Une région spécifique d'un gène marqueur (en général l'ADNr 16S) est ensuite amplifiée par PCR. Les amplicons obtenus sont alors séquencés par une technique de séquençage haut-débit. Des outils de bio-informatique permettent alors de filtrer, trier, regrouper en OTU ou ASV (richesse taxonomique). Ce traitement permet d'obtenir un aperçu détaillé de la composition et de la structure des communautés microbiennes, en prenant en compte à la fois la richesse et l'abondance relative de chaque OTU ou ASV. Il est également possible de les classer selon leur affiliation taxonomique par comparaison avec des bases de données de référence.

GAMME DE VARIATION

Indicateurs	Unité de mesure	Mode d'occupation du sol	Min	Max	Médiane
Richesse taxonomique bactérienne	Nb d'OTU	Grandes cultures (n = 740 obs) profondeur : 0-25 cm	1800	2210	2700
		Prairies (n = 464 obs) profondeur : 0-30 cm	1680	2160	2550
		Vignes et vergers (n = 27 obs) profondeur : 0-30 cm	1930	2290	2620
		Forêts (n = 492 obs) profondeur : 0-30 cm	1360	1940	2510
		Vignes (n = 121 obs) * profondeur : 0-20 cm	1596	1934	2424

*Source : Données du réseau RMQS sur 0-30 cm (Saby et al, 2019), *projet SolAR*

https://www.plan-deperissement-vigne.fr/recherches/programmes-de-recherche/solar
https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2024/01/COLLOQUE-EUROVITI-2024.pdf

INTERPRÉTATION

La diversité bactérienne d'un sol se caractérise non seulement par la richesse taxonomique, c'est-à-dire le nombre de taxons présents, mais aussi par la répartition de leur abondance relative au sein de la communauté. La diversité bactérienne est directement reliée aux fonctions portées par le sol et à son aptitude à résister aux perturbations environnementales. Il est ainsi estimé que plus la diversité est importante, meilleur sera le fonctionnement du sol (Pedrinho et al., 2024). Il a été montré qu'une perte de 30% de biodiversité pouvait altérer le fonctionnement du sol (baisse de la dégradation de la MO, altération de la structure du sol et réduction de la capacité du sol à faire barrière aux espèces invasives pathogènes) (Maron et al., 2018).

21 DIVERSITE BACTERIENNE

INTERPRÉTATION (SUITE)

A l'échelle de la France, les variations de la diversité bactérienne sont en grand partie expliquées par les caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, teneurs en sables et argile, ratio C/N, etc.). Par exemple, les sables à pH neutre à basique et riches en matières organiques avec des C/N faibles possèdent une diversité bactérienne plus élevée que les sols argileux, acides et riches en matières organiques avec des C/N élevés (Karimi et al., 2018). Cependant, d'autres facteurs jouent également un rôle important, tels que le climat, l'usage des sols, la couverture végétale ou encore les pratiques agricoles.

Les paramètres physico-chimiques du sol, associés à des facteurs contextuels comme la localisation géographique et le climat, permettent d'estimer une valeur de référence de la diversité bactérienne attendue, sur la base de modèles prédictifs, développés notamment par l'INRAE en s'appuyant sur les données du RMQS. Les valeurs de diversité bactérienne mesurées sur le terrain peuvent ainsi être rapportées à des référentiels, afin d'évaluer leur cohérence avec les conditions pédoclimatiques, ou si elles traduisent un impact potentiel des usages du sol et des pratiques agricoles. D'autres référentiels européens (Labouyrie et al., 2023), régionaux ou Bases De Données peuvent également être mobilisés pour affiner ce diagnostic (Maretto et al., 2023).

AVANTAGES / LIMITES

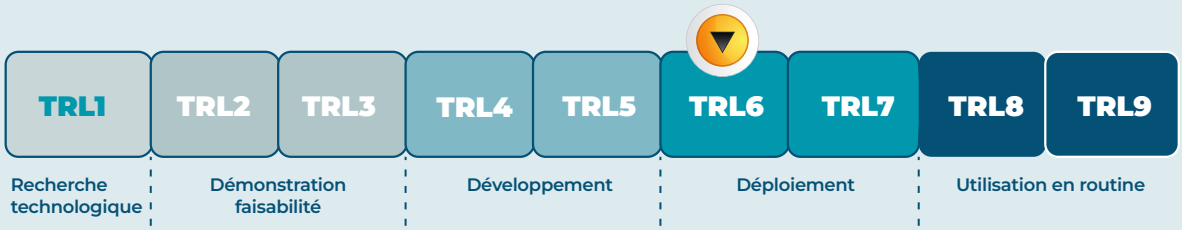
Méthode bien référencée, notamment pour l'effet du pédoclimat. Cette méthode permet de détecter une grande diversité de microorganismes, y compris ceux qui sont rares et non cultivables. En effet, elle permet de s'affranchir des biais des techniques d'isolement et de culture utilisés en microbiologie classique. Cette méthode est applicable à grande échelle (suivis territoriaux, réseaux de surveillance environnementale) et polyvalente (différents types de sols, d'usages et de contextes).

Par approche métabarcoding, les données valorisables se limitent aujourd'hui à un nombre de taxons et leur abondance relative respective. De plus, l'assignation taxonomique reste encore imparfaite. Cette approche seule ne permet pas de définir le lien entre les espèces et les fonctions exprimées par les microorganismes. Il est donc important de la combiner si possible à d'autres approches, donnant accès aux fonctions microbiennes.

Les étapes de séquençage et de bio-informatique sont relativement longues avec les technologies actuelles (2 à 3 mois).

La procédure d'extraction de l'ADN peut différer selon les laboratoires. Pour suivre une évolution, il convient d'utiliser la même méthode. De la même façon, il est recommandé de conserver le même prestataire réalisant le séquençage par métabarcoding afin d'assurer une cohérence et une comparaison fiable des résultats.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 150 - 200 €

SOURCES

Karimi B., Chemidlin Prévost-Bouré N., Dequiedt S., Terrat S., Ranjard L., 2018 – Atlas français des bactéries du sol. Biotope, Mèze, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 192 p.

Labouyrie, M., Ballabio, C., Romero, F., Panagos, P., Jones, A., Schmid, M., Mikryukov, V., Dulya, O., Tedersoo, L., Bahram, M., Lugato, E., van der Heijden, M.G.A., Orgiazzi, A. 2023. Patterns in soil microbial diversity across Europe. Nature Communications. 14, Article number: 3311, doi: 10.1038/s41467-023-37937-4 ; Data available: The dataset includes bacterial 16S data and fungal ITS raw DNA sequences for 885 samples collected as part of LUCAS 2018 Soil survey (Biodiversity module).

Maron PA, Sarr A, Kaisermann A, Lévêque J, Mathieu O, Guigue J, Karimi B, Bernard L, Dequiedt S, Terrat S, Chabbi A, Ranjard L. High Microbial Diversity Promotes Soil Ecosystem Functioning. Appl Environ Microbiol. 2018 Apr 16;84(9):e02738-17. doi: 10.1128/AEM.02738-17. PMID: 29453268; PMCID: PMC5930326.

Pedrinho, A., Mendes, L.W., Pereira, A.P.A., et al. (2024). Soil microbial diversity plays an important role in resisting and restoring degraded ecosystems. Plant and Soil, 500, 325–349.https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-024-06489-x

Terrat et al. 2015. Meta-barcoded evaluation of the ISO standard 11063 DNA extraction procedure to characterize soil bacterial and fungal community diversity and composition. Microbial Biotechnology, 8 (1), pp.131-142.

Maretto L, Deb S, Ravi S, Della Lucia MC, Borella M, Campagna G, Squartini A, Concheri G, Nardi S, Stevanato P. 16S metabarcoding, total soil DNA content, and functional bacterial genes quantification to characterize soils under long-term organic and conventional farming systems. Chem Biol Technol Agric. 2023;10:78. doi:10.1186/s40538-023-00450-3.

22 DIVERSITE FONGIQUE

DÉFINITION

La diversité fongique désigne la structure des communautés fongiques d'un sol, en tenant compte à la fois de la richesse taxonomique et de l'abondance relative de chacun des groupes de ces communautés.
Par approche métabarcoding, cette diversité est estimée à partir d'OTUs (Unités Taxonomiques Opérationnelles), soit le regroupement d'organismes présentant une séquence d'ADN similaire pour le gène cible (ADNr 18S) ; ou d'ASVs (Amplicon Sequence Variants). La diversité exprimée en ASVs permet une résolution plus fine, par la distinction des séquences uniques sans regroupement préalable.
Pour la diversité fongique, les régions ITS (Internal Transcribed Spacer), plus variables, sont préférentiellement utilisées comme marqueurs moléculaires pour une identification taxonomique plus précise (Labouyrie et al., 2023).

NORME

NF EN ISO 11063 : Qualité du sol - Extraction directe de l'ADN du sol

ISO 17601 : Qualité du sol - Estimation de l'abondance de séquences de gènes microbiens par amplification par réaction de polymérisation en chaîne (PCR)

ECHANTILLONNAGE ET LOGISTIQUE

Analyse sur sol frais

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE

L'ADN total des microorganismes est d'abord extrait puis purifié. Une région spécifique d'un gène marqueur (en général les ITS ou l'ADNr 18S) est ensuite amplifiée par PCR. Les amplicons obtenus sont alors séquencés par une technique de séquençage haut-débit. Des outils de bio-informatique permettent alors de filtrer, trier, regrouper en OTU ou ASV (richesse taxonomique). Ce traitement permet d'obtenir un aperçu détaillé de la composition et de la structure des communautés microbiennes, en prenant en compte à la fois la richesse et l'abondance relative de chaque OTU ou ASV. Il est également possible de les classer selon leur affiliation taxonomique par comparaison avec des bases de données de référence.

GAMME DE VARIATION

Indicateurs	Unité de mesure	Mode d'occupation du sol	Min	Médiane	Max
Richesse taxonomique bactérienne	Nb d'OTU	Grandes cultures (n = 740 obs) profondeur : 0-25 cm	1020	1510	1950
		Prairies (n = 464 obs) profondeur : 0-30 cm	980	1490	1870
		Vignes et vergers (n = 27 obs) profondeur : 0-30 cm	970	1390	1900
		Forêts (n = 492 obs) profondeur : 0-30 cm	1000	1390	1790
		Vignes (n = 121 obs)* profondeur : 0-20 cm	1063	1734	2495

*Source : Données du réseau RMQS sur 0-30 cm (Saby et al, 2019), *projet SolAR*
https://www.plan-deperissement-vigne.fr/recherches/programmes-de-recherche/solar

INTERPRÉTATION

La diversité fongique d'un sol se caractérise non seulement par la richesse taxonomique, c'est-à-dire le nombre de taxons présents, mais aussi par la répartition de leur abondance relative au sein de la communauté. La diversité fongique est directement reliée aux fonctions portées par le sol et à son aptitude à résister aux perturbations environnementales. Il est ainsi estimé que plus la diversité est importante, meilleur sera le fonctionnement du sol (Pedrinho et al., 2024). Il a été montré qu'une perte de 30% de biodiversité pouvait altérer le fonctionnement du sol (baisse de la dégradation de la MO, altération de la structure du sol et réduction de la capacité du sol à faire barrière aux espèces invasives pathogènes) (Maron et al., 2018).

INTERPRÉTATION (SUITE)

A l'échelle de la France, les variations de la diversité fongique sont en grand partie expliquées par les caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, teneurs en sables et argile, ratio C/N, etc.). Par exemple, les sols sableux à pH neutre présentent ainsi la plus grande diversité fongique (Djemiel et al., 2024).

Les paramètres physico-chimiques du sol, associés à des facteurs contextuels comme la localisation géographique et le climat, permettent d'estimer une valeur de référence de la diversité fongique attendue, sur la base de modèles prédictifs, développés notamment par l'INRAE en s'appuyant sur les données du RMQS. Les valeurs de diversité fongique mesurées sur le terrain peuvent ainsi être rapportées à des référentiels, afin d'évaluer leur cohérence avec les conditions pédoclimatiques, ou si elles traduisent un impact potentiel des usages du sol et des pratiques agricoles. D'autres référentiels européens (Labouyrie et al., 2023), régionaux ou Bases De Données peuvent également être mobilisés pour affiner ce diagnostic.

AVANTAGES / LIMITES

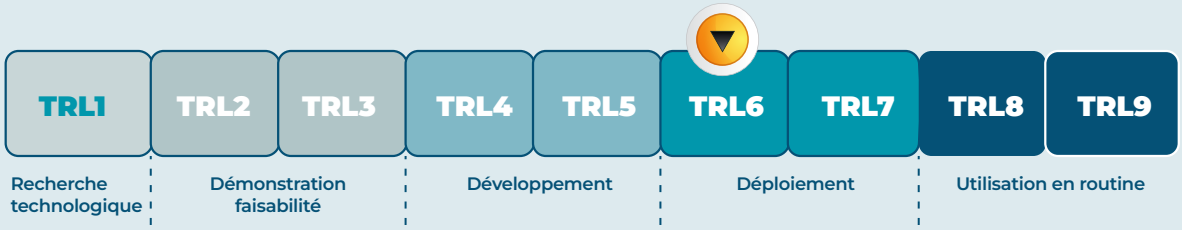
Méthode bien référencée, notamment pour l'effet du pédoclimat. Cette méthode permet de détecter une grande diversité de champignons, y compris ceux qui sont rares et non cultivables. En effet, elle permet de s'affranchir des biais des techniques d'isolement et de culture utilisés en microbiologie classique. Cette méthode est applicable à grande échelle (suivis territoriaux, réseaux de surveillance environnementale) et polyvalente (différents types de sols, d'usages et de contextes).

Par approche métabarcoding, les données valorisables se limitent aujourd'hui à un nombre de taxons et leur abondance relative respective. De plus, l'assignation taxonomique reste encore imparfaite. Cette approche seule ne permet pas de définir le lien entre les espèces et les fonctions exprimées par les microorganismes. Il est donc important de la combiner si possible à d'autres approches, donnant accès aux fonctions microbiennes.

Les étapes de séquençage et de bio-informatique sont relativement longues avec les technologies actuelles (2 à 3 mois).

La procédure d'extraction de l'ADN peut différer selon les laboratoires. Pour suivre une évolution, il convient d'utiliser la même méthode. De la même façon, il est recommandé de conserver le même prestataire réalisant le séquençage par métabarcoding afin d'assurer une cohérence et une comparaison fiable des résultats.

NIVEAU D'OPÉRATIONNALITÉ



- 150 - 200 €

SOURCES

Bonisseau, M., Cahurel, J.-Y., & Gontier, L., 2024. Apports organiques et impacts sur le sol : Retours d'expérience de trois projets menés au sein de l'IFV. Colloque EUROVITI, SIVAL, Angers, France.

Djemiel C., Terrat S., Dequiedt S., Jolivet C., Maron P.-A., Ranjard L., 2024. – Atlas français des champignons du sol. Éditions Biotope, Mèzen Muséum national d'histoire naturelle, Paris, 304 pages.

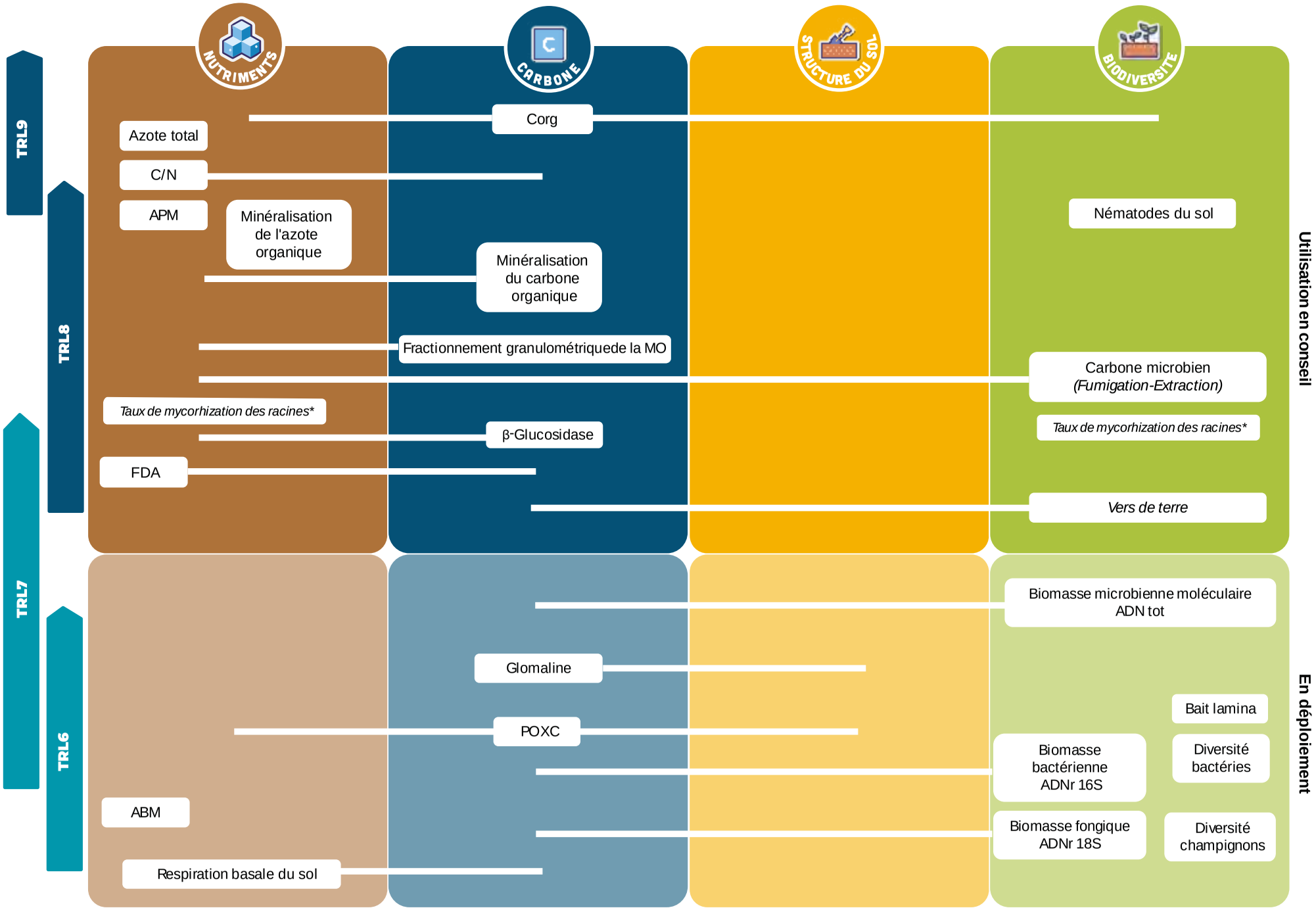
Labouyrie, M., Ballabio, C., Romero, F., Panagos, P., Jones, A., Schmid, M., Mikryukov, V., Dulya, O., Tedersoo, L., Bahram, M., Lugato, E., van der Heijden, M.G.A., Orgiazzi, A. 2023. Patterns in soil microbial diversity across Europe. Nature Communications. 14, Article number: 3311, doi: 10.1038/s41467-023-37937-4 ; Data available: The dataset includes bacterial 16S data and fungal ITS raw DNA sequences for 885 samples collected as part of LUCAS 2018 Soil survey (Biodiversity module).

Maron PA, Sarr A, Kaisermann A, Lévêque J, Mathieu O, Guigue J, Karimi B, Bernard L, Dequiedt S, Terrat S, Chabbi A, Ranjard L. High Microbial Diversity Promotes Soil Ecosystem Functioning. Appl Environ Microbiol. 2018 Apr 16;84(9):e02738-17. doi: 10.1128/AEM.02738-17. PMID: 29453268; PMCID: PMC5930326.

Terrat et al. 2015. Meta-barcoded evaluation of the ISO standard 11063 DNA extraction procedure to characterize soil bacterial and fungal community diversity and composition. Microbial Biotechnology, 8 (1), pp.131-142.

Pedrinho, A., Mendes, L.W., Pereira, A.P.A., et al. (2024). Soil microbial diversity plays an important role in resisting and restoring degraded ecosystems. Plant and Soil, 500, 325–349.https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-024-06489-x

SYNTHESE DES INDICATEURS PAR RAPPORT AUX FONCTIONS DU SOL RENSEIGNEES



** = mesure effectuée sur plante*

Synthèse des indicateurs proposés

Type d'indicateurs	Indicateurs	Labo/ Terrain	Coût	Technique et appareillage	Analyse sur sol : sec/frais	Norme disponible	Degré de maturité
			(1: faible à 3: élevé)	*(1: laboratoire d'analyse de terre ou 2 : laboratoire spécialisé)*		*(1 : Norme, 2 : méthode publiée mais pas de norme, 3 : Différentes méthodes)*	
Organiques	Carbone Organique du sol	Labo	1	1	sec	1	TRL 9
	Azote total et C/N	Labo	1	1	sec	1	TRL 9
	Fractionnement granulométrique de la MO	Labo	2	2	sec	1	TRL 8
	Carbone oxydé au permanganate de potassium (POXC)	Labo/ Terrain	1	2	sec	2	TRL 6-7
Abondance	C microbien (fumigation-extraction)	Labo	2	2	frais	2	TRL 8
	Biomasse microbienne moléculaire - ADN total	Labo	3	2	frais	2	TRL 7
	Biomasse bactérienne - ADNr 16S	Labo	3	2	frais	3	TRL 6
	Biomasse fongique - ADNr 18S	Labo	3	2	frais	3	TRL 6
	Taux de mycorhization	Labo	2	2	frais	2	TRL 7
Activité	Minéralisation de l'azote organique	Labo	3	2	frais	2	TRL 8
	Minéralisation du carbone organique	Labo	3	2	frais	2	TRL 8
	Méthode FDA (Fluorescein di-acétate)	Labo	2	2	frais	2	TRL 7-8
	β-glucosidase (GLU)	Labo	2	2	frais	1	TRL 7-8
	Glomaline	Labo	1	2	frais	2	TRL 6-7
	Respiration basale du sol*	Terrain	2	-	-	2	TRL 6
	APM	Labo	2	2	frais	2	TRL 8
	ABM	Labo	2	2	frais	2	TRL 6
	Bait lamina*	Terrain	1	-	-	2	TRL 7-8
Diversité	Nématodes du sol	Labo	3	2	frais	1	TRL 8 - 9
	Vers de terre*	Terrain	2	-	-	2	TRL 7-8
	Diversité bactérienne	Labo	3	2	frais	2	TRL 6
	Diversité fongique	Labo	3	2	frais	2	TRL 6

** Méthode d'interprétation uniquement en comparaison*

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR

MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA SOUVERAINETÉ
ALIMENTAIRE

© ARVALIS - Septembre 2025 - Imprimé par UniLaSalle