



HAL
open science

Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols

Benjamin Balloy, Antonio Bispo, Alain Bouthier, Claire Chenu, Daniel
Cluzeau, Francesca Degan, Laure Metzger

► To cite this version:

Benjamin Balloy, Antonio Bispo, Alain Bouthier, Claire Chenu, Daniel Cluzeau, et al.. Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols. 2017, 61 p. hal-02788601

HAL Id: hal-02788601

<https://hal.inrae.fr/hal-02788601>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TOUR D'HORIZON DES INDICATEURS RELATIFS À L'ÉTAT ORGANIQUE ET BIOLOGIQUE DES SOLS

Initié par le Ministère en charge de l'agriculture, ce document est le résultat du travail d'un groupe d'experts réuni en 2016 et 2017.

Les auteurs principaux sont Benjamin Balloy – APCA Antonio Bispo – ADEME, Alain Bouthier – Arvalis, Claire Chenu – AgroParisTech, Daniel Cluzeau – Université Rennes1, Francesca Degan – ACTA,, Laure Metzger – RITTMO. ainsi que les personnes en charge du dossier au MAA (DGPE et DGER). L'ensemble des nombreux autres contributeurs qui ont validé et précisé le document final est remercié pour leurs apports et conseils.

Champ traité et mandat du groupe d'experts

L'objectif du document est de recenser les indicateurs et les outils mesurant ou évaluant le statut organique et biologique des sols et d'en détailler la nature, la maturité, les avantages, les limites, et les perspectives de développement. Ce recensement n'est volontairement pas exhaustif : il vise prioritairement à cibler les indicateurs les plus répandus et génériques, ainsi que ceux qui présentent un fort potentiel de développement dans les dix prochaines années.

Le document ne s'intéresse pas uniquement aux indicateurs mais examine également les mesures et outils à disposition des exploitants agricoles pour évaluer l'état de leurs parcelles et les effets de leurs pratiques.

Pour chaque méthode, sont répertoriés :

- ce qui est mesuré lorsqu'il s'agit d'une méthode de mesure, ou ce qui est estimé ;
- qui l'utilise et pour quel objectif ;
- comment s'effectue la mesure ou l'estimation ;
- le stade de développement et le niveau d'appropriation de l'outil ou de la méthode et de ses résultats ;
- l'échelle de pertinence et les incertitudes sur les résultats ;
- les avantages et limites.

Le groupe d'experts avait pour mandat de produire un document de synthèse technique et scientifique, de nature descriptive, pouvant servir d'appui aux groupes de concertation discutant de l'évolution des politiques publiques en lien avec les sols.

TABLE DES MATIÈRES

INDICATEURS : DÉFINITIONS, ÉCHELLES ET RÉFÉRENTIELS.....	4
<u>1.VARIABLES ET INDICATEURS QUANTITATIFS ET QUALITATIFS DES MATIÈRES ORGANIQUES ET DES ÉLÉMENTS MAJEURS CARBONE ET AZOTE.....</u>	<u>7</u>
1.1.Méthodes classiques.....	7
• 1.1.1.Teneur en carbone.....	7
• 1.1.2.Teneur en azote.....	8
• 1.1.3.C/N.....	10
• 1.1.4.Fractionnement granulométrique des matières organiques.....	10
• 1.1.5.Stocks de carbone, d'azote ou de matière organique des sols.....	12
1.2.Méthodes en développement.....	13
• 1.2.1.Teneurs de C et N par mesures optiques.....	14
• 1.2.2.Méthode Rock-Eval (issue de la géologie).....	15
1.3.Autres méthodes (non normalisées).....	17
• 1.3.1.Pour analyser le C des sols.....	17
• 1.3.2.Méthode Hérody.....	17
<u>2.MÉTHODES RELATIVES À L'ÉTAT BIOLOGIQUE DU SOL.....</u>	<u>19</u>
2.1.Bioindicateurs microbiologiques.....	20
• 2.1.1.Respiration du sol9	20
• 2.1.2.Biomasse microbienne (méthode par fumigation-extraction)12.....	21
• 2.1.3.Activité enzymatique (ex : essais Biolog et autres analyses individuelles).....	22
• 2.1.4.Biomasse moléculaire microbienne du sol.....	24
• 2.1.5.Diversité taxonomique microbienne.....	25
2.2.Bioindicateurs faunistiques.....	27
• 2.2.1.Lombriciens.....	27
• 2.2.2.Nématofaune.....	29
• 2.2.3.Enchytréïdes24.....	30
• 2.2.4.Microarthropodes du sol 25.....	30
2.3. Indicateurs complémentaires.....	32
• 2.3.1.Test bêche.....	32
• 2.3.2. Indicateur à venir sur l'ensemble de la biodiversité du sol : le metabarcoding.....	33
2.4.Indicateurs indirects.....	33
• 2.4.1.Indicateur relatif à la stabilité structurale des sols.....	33
• 2.4.2.Litter-bag, tea bag, bait lamina.....	35

3.SUIVI DE L'EFFET DES PRATIQUES SUR L'ÉTAT ORGANIQUE ET BIOLOGIQUE DU SOL.....	36
3.1.Suivis possibles à partir d'indicateurs d'état.....	36
• 3.1.1.Indicateurs relatifs aux fractions de la matière organique (voir partie 1).....	36
• 3.1.2.Indicateurs microbiologiques (voir partie 2).....	37
• 3.1.3.Indicateurs d'activité enzymatique (voir partie 2).....	38
• 3.1.4.Indicateurs liés à la composition en lombriciens (voir partie 2).....	38
• 3.1.5.Indicateurs liés à la composition en nématodes.....	38
3.2.Outils d'aide à la décision mobilisant le modèle AMG à l'échelle parcellaire (outils Agrotransfert et Arvalis).....	38
4.INDICATEURS DE POTENTIALITÉS D'ÉVOLUTION DES SOLS.....	40
5.TRAVAUX EN COURS ET PROJETS À VENIR.....	43
5.1.Observatoires de longue durée.....	43
• 5.1.1.L'observatoire Agricole de la Biodiversité (OAB)30.....	43
• 5.1.2.Réseau de surveillance biologique du territoire pour évaluer les effets non intentionnels des pratiques agricoles (Biovigilance SBT-ENI).....	43
5.2.Projets aboutis ou en cours d'aboutissement (soutenus par le MAA) :.....	45
• 5.2.1.CASDAR Agrinnov (Indicateurs de l'état biologique des sols agricoles & démarche participative) (CASDAR IP 2011-2014).....	45
• 5.2.2.CASDAR Sys-Vit Sol-Vin (CASDAR IP 2011-2014).....	45
• 5.2.3.CASDAR AMG (CASDAR RFI 2009-2011).....	45
• 5.2.4.CASDAR Réseau PRO (CASDAR IP 2011-2014).....	45
• 5.2.5.CASDAR INDIBIO (CASDAR RF 2011-2013, financements supplémentaires du CNIEL et d'INTERBEV32).....	46
5.3.Travaux en cours.....	46
• 5.3.1.CASDAR QUASAGRO (CASDAR IP 2015-2018).....	46
• 5.3.2.CASDAR VITIFOREST (CASDAR IP 2015-2018).....	46
• 5.3.3.CASDAR Microbioterre (CASDAR RT - 2017-2021).....	47
• 5.3.4.CASDAR MYCOAGRA (CASDAR IP 2017-2021).....	47
5.4.Travaux en projet.....	47
6.COMMENTAIRES COMPLÉMENTAIRES.....	48
7.CONCLUSION.....	50
BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE.....	51
GLOSSAIRE.....	56
ANNEXE 1 : NORMES.....	58

INDICATEURS : DÉFINITIONS, ÉCHELLES ET RÉFÉRENTIELS

Que ce soit sous l'effet du climat ou par l'action de l'homme, les caractéristiques des sols évoluent. Il est possible de suivre ces modifications à travers la mesure et la quantification de différentes variables, utilisées en tant qu'indicateurs, mesurables et quantifiables, traçant la présence, le niveau ou l'évolution d'un phénomène. Une même variable peut être quantifiée avec des méthodes analytiques ou d'observations différentes. Les méthodes peuvent être formalisées par des modes opératoires, lesquels peuvent éventuellement faire l'objet d'une norme internationale ou nationale (ISO, NF, etc.).

Un même indicateur peut servir à des multiples objectifs, selon la question posée. Un indicateur peut être simple ou composé de plusieurs variables mesurées (par exemple, le C/N est calculé à partir des résultats de mesure des teneurs en carbone organique et en azote). En outre, un mode opératoire défini peut générer plusieurs variables qui combinées entre elles, donnent plusieurs indicateurs. Par exemple, à partir du comptage et de la caractérisation des lombriciens, on peut distinguer des indicateurs globaux tels que l'abondance (nb individus/m²) et la biomasse (g/m²) totales, des indicateurs fonctionnels tels que l'abondance par catégories écologiques, des indicateurs taxonomiques tels que richesse, diversité et équitabilité...

Une typologie d'indicateurs d'état chimique, physique, biologique et organique des sols peut être définie par rapport à la question posée et au degré d'opérabilité (Valé et al., 2011) :

- indicateur de recherche / expérimentation : les indicateurs sont utilisés pour le paramétrage des modèles ou pour la compréhension des processus ;
- indicateurs d'évaluation / de suivi : par rapport aux indicateurs de recherche, ils sont mesurables en routine. Les méthodes de mesure sont normalisées ou non. Cependant, un référentiel n'est pas toujours disponible, en particulier pour les indicateurs biologiques ;
- indicateurs de diagnostic : en plus des indicateurs d'évolution, certains référentiels physico-chimiques sont validés et utilisés, couramment pour diagnostiquer les états chimiques et apporter des solutions (par exemple en vue de choix agronomiques). Concernant les indicateurs biologiques, certains permettent d'effectuer des diagnostics et de formuler des conseils associés (par ex., biomasse microbienne par fumigation, lombriciens).

D'autres typologies d'indicateurs se définissent par rapport à l'échelle temporelle :

- certains indicateurs sont adaptés pour mettre en évidence des changements sur le long terme (stockage de carbone) ;
- d'autres indicateurs donnent des indications sur les effets à court terme. Ces indicateurs peuvent éventuellement être utilisés pour prévenir des risques sur le long terme.

En termes d'échelle spatiale, certains indicateurs varient beaucoup plus que d'autres dans la dimension horizontale et verticale (stockage de carbone et bioindicateurs¹ vs granulométrie). Les schémas d'échantillonnage et la résolution des prélèvements par surface étudiée dépendent de la variabilité spatiale et temporelle de l'indicateur.

1 - Bioindicateur : état d'organisation biologique (une partie d'un organisme, un organisme ou une communauté d'organismes) qui renseigne sur l'état et le fonctionnement d'un écosystème. Cela intègre donc des réponses à différentes échelles (moléculaire, cellulaire, individuelle, comportementale, populationnelle et communautaire).

L'interprétation des indicateurs nécessite :

- de disposer d'un **référentiel** adapté à la question et à la variabilité du contexte environnemental (contexte pédoclimatique, occupation des sols, usage, etc.). Les référentiels permettent d'interpréter les résultats des indicateurs selon la relation indicateur-fonction² : par exemple en appréciant le niveau favorable à la mise en place de culture (positif) ou un caractère favorable à la lixiviation des nitrates dans l'environnement (négatif) ;
- d'identifier l'**état optimum** par rapport à un ou plusieurs objectifs donnés relatifs à une fonction du sol (par exemple nutrition, maintien de la structure... influant sur la fonction production de biomasse, fonctions environnementales...).

Ces références permettent d'utiliser les indicateurs et des paramètres calculés pour :

- la comparaison (*a posteriori*) ;
- le diagnostic puis le pronostic (*a priori*).

Les indicateurs utilisés pour le **diagnostic et le pronostic** doivent permettre de répondre à des questions sur l'état actuel du sol – diagnostic - et sur les évolutions possibles – pronostic - selon les pratiques envisagées. Les indicateurs peuvent en particulier être utilisés pour quantifier l'effet de changements de pratiques agricoles : Quels sont les effets des pratiques agricoles ? Quel est le lien avec des risques environnementaux (lixiviation de nitrates par exemple) ? Quelles sont les fonctions et services écosystémiques des sols qui seront modifiées et dans quel sens ?

Lorsqu'il s'agit d'indicateurs relatifs au stockage du carbone, l'utilisation des indicateurs et des référentiels associés est basée sur des résultats d'expérimentations, notamment de longue durée, sur plusieurs sites, représentatifs à la fois des contextes pédoclimatiques et des effets des pratiques. Les effets des traitements doivent pouvoir être discriminés par rapport à ceux des variables édaphiques et environnementales, et l'évolution des indicateurs doit permettre de rendre compte de l'effet de l'historique des pratiques et des systèmes de culture (apport des PRO³, rotation des CIPAN⁴, travail du sol, etc...).

La vitesse de réponse peut être très différente d'un indicateur à l'autre. A chacune des questions posées ce sont différents indicateurs qui devront être choisis en fonction de leur pertinence vis-à-vis de la fonction étudiée. La détection précoce des effets (par exemple d'un changement de pratiques) reste encore un défi pour certaines variables pédologiques comme l'état structural, car les dégradations peuvent être constatées plus rapidement que les évolutions positives.

La variabilité temporelle des résultats – saisonnière ou sous l'effet de pratiques - est également à prendre en compte pour de nombreux indicateurs, en particulier biologiques⁵ : il est alors nécessaire de définir les périodes les plus propices à une faible variabilité intrinsèque des phénomènes observés.

Remarques additionnelles :

- la qualité de prise des échantillons est importante car quelles que soient les méthodes de mesure quantitative, la variabilité de la répartition de la matière organique et des organismes dans l'espace – à l'intérieur d'une parcelle, en fonction de la profondeur - et dans le temps – saison, dates des pratiques culturales... - est à prendre en considération ;

2 - un même niveau d'un indicateur donné peut être qualifié de bon ou mauvais selon la fonction à laquelle on se réfère

3 - Produits résiduels organiques

4 - Cultures intermédiaires pièges à nitrates

5 - par exemple l'enfouissement de couverts végétaux modifie temporairement la biomasse microbienne : c'est une réponse immédiate à une pratique culturale mais cet effet est de courte durée

- la profondeur d'échantillonnage est ainsi importante à considérer car certains systèmes de culture peuvent engendrer une stratification de la matière organique se traduisant par une concentration l'horizon 0-5 cm ou 0-10 cm (ex : réduction du travail du sol). Selon les indicateurs il sera donc pertinent d'échantillonner dans la couche 0-5 ou 0-10 cm (biomasse et activité microbienne...) ou sur la couche correspondant à l'ancien labour (stock de C et N organique) ;
- les méthodes d'analyse des sols s'effectuent le plus souvent sur terre fine (<2mm). Les fractions grossières et les litières en surface ne sont donc pas comptabilisées par ces méthodes alors qu'elles peuvent être des compartiments de stockage de carbone et des fractions biologiquement très actives présentant des enjeux importants.

Les indicateurs présentés dans ce document sont des indicateurs utilisés et mobilisables tant en zones tempérées que tropicales.

1. VARIABLES ET INDICATEURS QUANTITATIFS ET QUALITATIFS DES MATIÈRES ORGANIQUES ET DES ÉLÉMENTS MAJEURS CARBONE ET AZOTE

1.1. Méthodes classiques

1.1.1. Teneur en carbone

Ce qui est mesuré

La teneur en carbone, mesurée à partir d'un échantillon généralement composite et tamisé pour obtenir la terre fine (< 2 mm), est exprimée le plus souvent en % (ou en g de C / kg de sol). On distingue les teneurs en C total, en C organique et en C minéral (carbonates).

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Ce résultat de routine des analyses de sol permet d'évaluer le statut du sol au regard de la concentration totale en azote et carbone et d'estimer les stocks correspondants (cf infra). La teneur en carbone est un indicateur fondamental pour qualifier les sols, à la fois en tant qu'indicateur de suivi ou de diagnostic. On utilise aussi ces paramètres pour interpréter d'autres paramètres dans l'analyse de terre courante.

Comment s'effectue la mesure :

- C total : combustion sèche et analyseur élémentaire (norme NF ISO 10694),
- C minéral : calcimétrie,
- C organiques : différence entre le C total et le C minéral, ou mesure par combustion sèche après décarbonation, ou encore oxydation en milieu humide « méthode Anne » (norme NF ISO 14235)

Le passage à la teneur en matière organique s'effectue par multiplication des teneurs en C mesurées (x par 1,72 le plus souvent). Cependant, le rapport teneur en matière organique / teneur en carbone varie avec le degré d'humification. Un indicateur proche de 2 est plus indiqué par exemple pour les horizons bien humifiés ou les sols forestiers (référence).

La comparaison de ces méthodes de mesure montre que les méthodes d'oxydation par voie humide comme celle de Walkley-Black ou Anne, quantifient des quantités de C moindres que les méthodes par « combustion sèche », en particulier parce qu'elles n'oxyderaient pas tous les charbons (Jolivet et Arrouays 1997 ; Nelson et al. 1996). Toutefois, les écarts sont très faibles, souvent inférieurs à l'écart entre laboratoires qui pratiquent la même méthode

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Normalisé, couramment proposé par les laboratoires d'analyse et utilisé par le monde agricole. C'est la méthode de référence pour le suivi de la qualité des sols en France (Arrouays et al. 2002 ; manuel du RMQS : Jolivet et al. 2016 ; Martin et al. 2011).

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

Précision : 1,3-1,7% de la valeur mesurée. De plus il existe des limites de quantification (par exemple de 0.4 % de C pour certains laboratoires avec la méthode Anne. En sol très calcaire, la méthode Dumas nécessite de calculer une différence (C total – Cminéral) ce qui accroît l'imprécision. L'existence de toutes ces incertitudes est très importante à prendre en considération lorsqu'il s'agit d'effectuer des comparaisons de résultats selon les pratiques ou au fil du temps. Lorsqu'on analyse des données d'essais à long terme, les meilleurs résultats sont obtenus en refaisant toutes les analyses en une seule fois (ex Dimassi et al., 2013, 2014 ; Autret et al, 2016).

Avantages / limites :

Pour les échantillons très sableux où la matière organique est essentiellement sous forme particulaire, des incertitudes de mesures peuvent être provoquées par des difficultés d'homogénéisation des prises d'essai au laboratoire. Les méthodes d'oxydation par voie humide comme celle de Walkley-Black ou Anne

sont désormais abandonnées par certains laboratoires pour des raisons d'hygiène et sécurité au profit de l'analyse élémentaire après combustion sèche. Ce changement de méthode, s'il se justifie à la fois par des raisons de sécurité et de justesse, peut néanmoins induire des biais dans l'analyse d'évolutions à long terme retracées à partir de bases de données historiques.

1.1.2. Teneur en azote

L'azote est présent dans les sols sous différentes formes chimiques. On peut mesurer séparément ou ensemble :

- l'azote total : l'ensemble des formes de l'azote ;
- l'azote minéral qui comprend l'azote ammoniacal (NH_4^+), et l'azote nitrique (NO_3^-) ;
- l'azote organique.

L'azote peut également être sous forme gazeuse (N_2O et N_2) ces quantifications ne sont pas traitées dans ce document du fait des quantités négligeables de ces formes dans le sol.

Le terme "azote minéral" comprend l'azote dissous dans la solution du sol ou fixé sur le complexe argilo-humique, dont les formes principales sont les ions nitrate (NO_3^- , azote nitrique) et ammonium (NH_4^+ , azote ammoniacal).

L'azote organique est intégré aux molécules organiques. L'azote organique constitue environ 95% de l'azote total d'un sol. Ces formes d'azote ne sont pas directement assimilables par les plantes (à l'exception de l'urée, une molécule de petite taille).

Qui l'utilise et pour quel objectif :

La gestion de l'azote au niveau de la parcelle est très importante pour des raisons agronomiques et environnementales. En effet, l'azote est souvent le premier nutriment limitant pour les plantes. Par ailleurs, les problématiques environnementales liées aux nitrates trouvent leur source dans la gestion de la fertilisation. Connaître les processus de minéralisation d'un sol et l'azote disponible sont des informations nécessaires pour répondre à ces enjeux avec une meilleure gestion de la

fertilisation, grâce au calcul des doses d'azote prévisionnelles.

Les formes minérales sont utilisées notamment pour établir le bilan azoté prévisionnel et ainsi programmer la fertilisation. Les échantillons sont prélevés soit après la récolte (reliques post récolte RPR), soit au début de l'hiver (reliques entrée hiver – REH), soit à la sortie de l'hiver (reliques de sortie d'hiver – RSH). La première mesure représente l'azote minéral restant dans le sol après une culture. Certaines de ces analyses sont devenues réglementaires dans le cadre de la directive nitrates. Les REH sont réalisés fin octobre/début novembre, avant que les pluies hivernales percolent et entraînent les nitrates vers la nappe d'eau. Ces analyses mesurent la quantité d'azote potentiellement soumise à la lixiviation des pluies. L'évolution entre RPR et REH peut s'expliquer par la minéralisation ou le prélèvement d'azote par la culture en place. Les RSH sont réalisés avant la reprise de la végétation et avant les apports azotés. Ces quantités d'azote sont utilisées pour le plan prévisionnel de fertilisation. La différence entre REH et RSH estime la quantité d'azote qui a pu être lessivé pendant l'hiver.

La mesure de l'azote combinée à celle du carbone permet de calculer des indicateurs complémentaires tels que le C/N (cf. 1.1.3).

Ce qui est mesuré :

On mesure l'azote total, l'azote organique et les différentes formes d'azote minéral.

Comment s'effectue la mesure :

Les méthodes pour mesurer l'azote minéral font l'objet d'une norme : NF ISO 14256. Cette méthode prévoit une première partie sur le prélèvement et la conservation de l'échantillon et une deuxième partie sur la méthode

analytique par extraction au chlorure de potassium et ensuite quantification par spectrophotométrie en flux continu. L'extraction se fait sur les échantillons fraîchement prélevés et conservés au froid (4 °C) pour éviter la minéralisation.

Le calcul de l'azote organique s'obtient par différence entre l'azote total et l'azote minéral
 $N_{org} = N_{tot} - N_{min}$.

L'azote total du sol est mesuré soit après combustion sèche (NF ISO 13878), cette analyse élémentaire étant conjointe de la mesure du C total du sol (cf infra), soit par méthode Kjeldahl (NF ISO 11261) qui est une minéralisation par H_2SO_4 suivie d'une distillation de NH_3 puis d'un dosage colorimétrique.

Stade de développement et le niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

L'azote total est une mesure présente dans tous les menus des laboratoires pour calculer le rapport C/N.

Concernant l'azote minéral, la réglementation « nitrates » demande à tout exploitant ayant plus de 3 ha en zone vulnérable de réaliser chaque année une analyse de sol sur le reliquat azoté en sortie d'hiver de préférence, sur les taux de matière organique pour les vignes et les prairies ou sur l'azote total si d'autres mesures ne sont pas disponibles. Ces analyses constituent au fur et à mesure des références pour les GREN (Groupes Régionaux d'Expertise Nitrates).

1.1.3. C/N

Ce qui est mesuré

Rapport de la teneur en C organique / N organique souvent assimilé à C total / N total (sauf pour les sols carbonatés). Ce rapport peut être mesuré sur des végétaux ou apports organiques au sol ou sur les sols.

Qui l'utilise et pour quel objectif

Lorsque le rapport C/N est mesuré sur des sols, il renseigne sur l'origine des matières organiques et leur degré d'évolution.

En sols agricoles et pour la matière organique des matières fertilisantes, les rapports C/N sont utilisés pour caractériser les matières organiques et leur minéralisation.

Un C/N de l'ordre de 9-10 dans l'horizon labouré traduit une bonne capacité de minéralisation de la matière organique. Si le C/N est supérieur à 11 ou inférieur à 9, la capacité de minéralisation de la matière organique du sol est réduite.

Lorsque le C/N est mesuré sur des végétaux ou apports organiques au sol (effluents, composts..) il renseigne sur les potentialités de biodégradation. Pour les résidus végétaux, un phénomène d'organisation nette d'azote se produit avec des résidus végétaux dont le C/N est supérieur à 12-15 (Justes et al, 2009). Cet indicateur est par exemple utilisé pour appréhender le comportement des matières organiques à la minéralisation, en particulier pour les fertilisants organiques. Lorsque le C/N est supérieur à 12-15 – cas des pailles par exemple - les micro-organismes mobiliseront de

l'azote présent dans les réserves du sol et dégraderont la matière organique riche en carbone. En dessous, leur activité se traduira par la minéralisation de la matière organique et donc par une libération d'azote, alors disponible pour la nutrition des plantes.)

Comment s'effectue la mesure

Le calcul fait appel à la mesure du carbone organique (respectivement total) et de l'azote organique (respectivement total) (cf supra).

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats

Calcul simple dès lors que les teneurs en C et N sont mesurées. Produit en routine par les laboratoires, cet indicateur est très répandu et utilisé depuis longtemps.

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats

Les incertitudes sont liées à l'estimation du C et du N organique.

Avantages / limites

Indicateur très simple à utiliser, mais il est peu « puissant », apportant peu d'information interprétable utilement sur le type de matière organique du sol. Il permet une première comparaison rapide et globale de l'équilibre carbone / azote dans un échantillon de sol ou de matière organique.

1.1.4. Fractionnement granulométrique des matières organiques

Ce qui est mesuré :

On quantifie la répartition du carbone du sol entre des particules grossières (> 0,05 mm ou 50 µm) et une fraction < 0,05 mm ou <50 µm) qui correspond à une matière organique humifiée. La fraction grossière, encore appelée « matières organiques particulières, correspond à des débris végétaux en cours de décomposition. C'est une matière organique peu associée aux minéraux, à rapport C/N

compris entre 12 et 30 environ, facilement minéralisable. La fraction < 50 µm contient la fraction la plus stable de la matière organique et correspond à 70 à 80 % du carbone total en zone tempérée. et permet donc d'identifier le stockage à plus long terme du carbone (matière organique humifiée). Elle correspond à ce qui est communément appelé « humus » et est liée à la rétention en eau et à la capacité d'échange cationique.

Parmi les différentes méthodes de fractionnement chimique et physique des matières organiques des sols, celle-ci est basée sur une dispersion des particules du sol et leur séparation granulométrique et densimétrique. La mesure porte sur la quantité de C ou de N présent dans les différentes fractions granulométriques du sol.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Les matières organiques ont un temps de résidence dans les sols variable en fonction de leurs dimensions. Les fractions les plus grossières (> 200µm ; 50-200µm), facilement séparables des minéraux, communément appelées matières organiques particulaires (MOP), sont les plus labiles (>0,05 mm, temps moyen de résidence entre 1 année et 20-30 ans) : les nutriments de cette fraction sont disponibles plus vite que ceux de la fraction stable et ces fractions réagissent plus vite aux changements de pratiques (ce sont donc des indicateurs précoces de changements) (Chan *et al.* 2001). A l'inverse, les fractions les plus fines (<50 µm) contiennent de la matière organique stable (temps moyen de résidence > 50 ans en sol cultivé tempéré) qui participe donc au stockage de matière organique de plus longue durée. Ces fractions sont également utilisées pour estimer la taille de compartiments cinétiques pour la modélisation des effets de changements de pratiques sur l'évolution de la matière organique du sol.

Cette mesure permet d'effectuer un diagnostic sur :

- la quantité et la qualité des matières organiques ;
- la structure de la matière organique (labile/stable) ;
- la disponibilité en azote (rapport C/N de la fraction labile).

Des préconisations agronomiques sont possibles à partir de ces indicateurs (par exemple, dans des situations d'enherbement dans les vignes et vergers, ou pour le choix des apports organiques : quantité et qualité).

Comment s'effectue la mesure :

La mesure consiste en un fractionnement physique (dispersion du sol, tamisage,

flottation, sédimentation, centrifugation) - de la terre fine (<2 mm) – pesée des fractions et mesure des teneurs en C et N sur les fractions. La norme de la mesure est le NF X31-516.

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Le protocole de fractionnement (Balesdent *et al.* 1991) a été normalisé (NF X 31-516 Septembre 2007 - Qualité du sol - Fractionnement granulodensimétrique des matières organiques particulaires du sol dans l'eau). Il est utilisé par 4 laboratoires en France, parfois dans des versions simplifiées. La mise en œuvre du protocole ne demande pas d'équipement sophistiqué, mais est longue et nécessite un apprentissage. Le coût est d'environ 100€ pour 3 fractions (et environ 50€ pour 2 fractions, contre le 70€ pour un menu classique de mesure physico-chimiques).

Envisagée en routine pour le RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols), la mesure n'est pas utilisée aujourd'hui par les agriculteurs, mais plutôt par des conseillers pour établir un bilan humique et conseiller sur le type d'apport organique. Une simplification de la méthodologie (notamment adaptation voire suppression de l'étape de flottation) permettrait de diminuer les coûts d'analyse et d'en élargir l'utilisation.

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

La variabilité intra-annuelle de la fraction <2mm est faible.

Avantages / limites

La mesure est facilement accessible, même si longue et encore coûteuse.

Les fractions grossières (matière organique particulaire) répondent rapidement à des changements de pratique (4 à 5 ans), comme l'apport de produits organiques, et permettent d'observer des changements dans des délais plus courts que lorsque l'on considère le stock total du sol.

1.1.5. Stocks de carbone, d'azote ou de matière organique des sols

Ce qui est mesuré :

Le stock de carbone, d'azote ou de matière organique du sol en tonnes (ou kg) de C ou N par unité de surface (ha ou m²).

Qui l'utilise et pour quel objectif :

C'est l'indicateur qui permet d'évaluer les ressources globales du sol en carbone et azote et d'observer un enrichissement ou un appauvrissement quantitatif dans le temps pour un horizon donné. Les teneurs sont analysées en routine mais pas la masse volumique apparente (cf infra « comment s'effectue la mesure »). Le stock de carbone est un indicateur essentiel de la qualité des sols, pour l'influence sur les fonctions du sol telles que les cycles biogéochimiques des nutriments, la rétention de l'eau et des nutriments. L'analyse des stocks de carbone donne des indications sur la dynamique temporelle et spatiale de ces fonctions. Cependant, les stocks varient très peu sur le moyen terme (5 – 10 ans). Sur le court et moyen terme, il est donc plus pertinent d'utiliser les fractions des matières organiques pour évaluer l'évolution de la qualité des matières organiques et l'évolution probable des stocks sur du plus long terme.

Comment s'effectue la mesure :

Le stock de C ou N s'évalue pour une unité de surface donnée en multipliant la teneur en C ou N (cf supra) par la masse volumique apparente du sol et par la profondeur de l'horizon (couche) du sol échantillonné. On somme ensuite les stocks de différents horizons pour avoir le stock du sol (exprimé en tonne par hectare), selon la formule :

$$\begin{aligned} C_{\text{stock}} = & p_1 \cdot DA_1 \cdot COS_1 \cdot (1-EG_1) \cdot 10 + \dots \\ & + p_i \cdot DA_i \cdot COS_i \cdot (1-EG_i) \cdot 10 + \dots \\ & + p_n \cdot DA_n \cdot COS_n \cdot (1-EG_n) \cdot 10 \end{aligned}$$

Où :

- p_i (en cm) est l'épaisseur de l'horizon i à considérer ;
- DA (en T.m⁻³) la masse volumique apparente ;
- COS la teneur en carbone organique de l'horizonl (g.kg⁻¹) ;
- EG la proportion volumique d'éléments grossiers supérieures à 2 mm (valeur entre 0 et 1) ;

- n le nombre d'horizons du profil à prendre en compte.

Cette masse volumique apparente peut être mesurée ou estimée à partir de fonctions de pédo-transfert s'appuyant, plus souvent, sur la granulométrie du sol et sa teneur en carbone.

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats

Outre les incertitudes déjà mentionnées pour la mesure des teneurs en C et N, l'incertitude liée à la mesure de masse volumique apparente est très importante.

Cette variable est essentielle puisqu'un sol qui est tassé aura une plus grande masse volumique apparente. Un prélèvement de l'horizon 0-20 cm pourra ainsi contenir plus de matière organique que ce même horizon n'en contiendrait en sol moins tassé (on risque ainsi de prendre un tassement du sol pour un enrichissement en matière organique). Lorsque l'on souhaite comparer l'évolution des stocks de C organique des sols, sous l'effet de pratiques ou de changements d'usage, il est donc essentiel de réaliser la mesure des stocks sur une même masse de terre par unité de surface, pour les différentes situations comparées (Ellert et Bettany, 1995).

La mesure directe de la masse volumique apparente est cependant le plus souvent limitée aux travaux de recherche, car c'est une mesure de terrain laborieuse et délicate, entachée d'une incertitude importante.

La présence d'éléments grossiers dans le sol limite fortement la mise en œuvre des mesures de masse volumique apparente. La masse volumique apparente est de plus très variable au sein d'une parcelle et le long d'un profil.

En routine, la généralisation de fonctions de pédotransfert basées sur la granulométrie et la teneur en carbone du sol, de même qu'une plus grande attention portée sur les profondeurs de prélèvement et leur harmonisation permettraient de réduire les incertitudes. Quel que soit le système de travail du sol, il est nécessaire de faire le prélèvement sur une profondeur de 25 à 30 cm (qui correspond souvent au labour le plus profond) pour suivre le stock de C et N au cours du temps. L'observation à chaque prélèvement du changement de couleur souvent observé à la

limite du plus profond labour (l'horizon inférieur moins organique est plus clair) sur une mini fosse, permet de repérer la profondeur du labour le plus profond. En systèmes sans labour, le prélèvement sur la couche superficielle du sol (0-10 cm) est insuffisant pour quantifier la variation de stock de C et N au cours du temps et il faut prélever également sur au moins 25-30 cm. La mesure de granulométrie présente l'avantage de ne devoir être faite qu'à une seule reprise sur chaque parcelle (pas de grande variation temporelle de la granulométrie des sols, sauf processus massif d'érosion. Toutefois l'hétérogénéité d'une parcelle peut conduire à devoir réaliser la mesure en plusieurs emplacements).

Les stocks des horizons inférieurs participent également au stockage (profondeur d'exploration racinaire et redistributions verticales). Cependant, peu de connaissances sont disponibles sur les stocks des horizons de profondeur par rapport aux stocks des horizons de surface, l'échantillonnage et la mesure de masse volumique apparente étant particulièrement laborieuses pour ces horizons. Une estimation des stocks sur l'intégralité du profil devrait être recherchée, pour le suivi d'évolution des stocks de C et N dans les essais et suivis de longue durée. Elle est mise en œuvre dans la 2ème campagne du RMQS (Jolivet *et al.* 2016).

La précision nécessaire pour évaluer à 5 ou 10 % près des évolutions de stocks C et N nécessite un échantillonnage important (mentionné : au moins 100 échantillons / parcelle pour observer des variations significatives sur 5 ans). L'ordre de grandeur de la précision pour une analyse en routine en conseil exploitant est plutôt de l'ordre de 15 % (conseil de 15 échantillons élémentaires). La précision relative moyenne sur les placettes du RMQS (25 échantillons mélangés sur 400 m²) a été estimée à 11%.

La quantification rigoureuse et précise des stocks de carbone est associée à un certain nombre de défis :

- la qualité de mesure des termes du stock de carbone (teneur en carbone, masse volumique apparente, teneur en éléments grossiers) ;

- la standardisation de la profondeur de prélèvement et la prise en compte de masses de sol équivalentes lorsque l'on compare différentes modalités de gestion dans des essais de longue durée ;
- la forte variabilité liée à l'hétérogénéité spatiale des stocks de carbone par rapport à la faible variabilité temporelle qui impose un repérage précis de la zone de prélèvement et un nombre d'échantillons ≥ 15 pour avoir une précision acceptable.
- l'incertitude liée à l'estimation de la masse volumique apparente, qui nécessite de la mesurer si on veut améliorer la précision dans les essais de longue durée.

Le principal défi concerne la diminution des incertitudes dans le calcul des stocks. On pourra en particulier se référer au manuel du RMQS.

Avantages / limites :

Les stocks de C et N informent sur la qualité des sols en lien avec des fonctions et apportent donc une information riche. En revanche, la difficulté dans la mesure de la masse volumique apparente, la variabilité des protocoles, les incertitudes des mesures ainsi que la forte hétérogénéité spatiale ne rendent pas ces indicateurs d'usage courant.

Du fait des incertitudes de mesure des stocks organiques et de leur lente évolution temporelle, ces indicateurs apparaissent actuellement très peu pertinents pour évaluer l'impact d'un changement de pratiques sur le court terme (5 ans au mieux).

Les évolutions temporelles sont en effet très faibles et souvent dans la marge d'incertitude de l'indicateur : il est donc absolument nécessaire, si l'on veut constater de manière fiable des évolutions de stock, de respecter des protocoles d'échantillonnage et de mesures complets, exigeants et très rigoureux (cf RMQS, manuel méthodologique Jolivet *et al.* 2016). Ces évolutions se constatent (sauf changement brutal) à moyen terme c'est-à-dire après 5ans au mieux.

1.2. Méthodes en développement

1.2.1. Teneurs de C et N par mesures optiques

Ce qui est mesuré :

La réflectance du sol pour en dériver les teneurs en éléments majeurs (dont le carbone) : rayonnement IR (moyen, proche) et rayonnement visible.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Cet indicateur est déjà bien opérationnel pour les mesures des teneurs en C et N, teneur en matière organique, texture, teneur en carbonates. Ces mesures utilisent le proche infra-rouge (NIRS) - il s'agit d'une technique connue depuis plus de 40 ans et utilisée pour analyser la composition des produits agricoles et alimentaires -, ou le moyen infrarouge (MIRS).

L'indicateur est en développement pour la qualité des matières organiques.

Cette technique permet de faire des mesures plus nombreuses car elle peut permettre de produire des résultats rapides, et peu coûteux, sous réserve de disponibilité de la calibration pour la situation mesurée.

En ce qui concerne les sols, cette technique n'est pas encore utilisée en routine car elle n'est utilisable que dans la gamme de sols dans laquelle elle a été calibrée. Jusqu'à maintenant, les travaux réalisés le sont sur des gammes de sols restreintes, cependant la grande polyvalence de l'outil pourrait permettre de faire de multiples déterminations différentes avec un seul outil et une seule analyse et donc de baisser le coût d'analyse. Une calibration à large échelle (France) est en cours par un institut technique (publication fin 2017), elle permettra de mieux apprécier l'intérêt de cette technique à large échelle.

Comment s'effectue la mesure :

Les mesures optiques de la teneur en C et N des sols utilisent la spectroscopie proche-infrarouge (NIRS) pour laquelle la norme ISO 17184 a été établie en 2014. La spectrométrie quantitative est basée sur des méthodes d'apprentissage : on construit des étalonnages sur des jeux d'échantillons caractérisés à la fois par leur spectre infra-rouge et la détermination classique des propriétés physico-chimiques étudiées (ici la teneur en C ou N). Cet étalonnage est ensuite utilisé pour prédire la

propriété (teneur en C ou N) sur de nouveaux échantillons d'après la détermination de leur spectre, dont l'acquisition est rapide (minutes), même si la préparation de l'échantillon requiert du temps. Les mesures peuvent s'effectuer en laboratoire. Elles peuvent aussi être effectuées sur le terrain soit avec un appareil portable, soit via des capteurs embarqués (agriculture de précision) ou encore par télédétection (sur sol nu).

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Le développement de la méthode dépend de la capacité à capitaliser les courbes de calibration. Le matériel est encore coûteux à l'acquisition mais peut être vite rentabilisé. L'utilisation de ces méthodes se développe rapidement en recherche. Les échantillons de sols du RMQS ont été analysés par ces méthodes (Grinand *et al.* 2012). Les développements récents concernent la mesure sur le terrain (Cambou *et al.* 2016 ; Gobrecht *et al.* 2014, Vaudour *et al.* 2016).

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

La méthode estime les teneurs en C et N avec des courbes d'étalonnage, mettant en relation les valeurs du spectre avec les teneurs. L'extrapolation d'un sol à l'autre n'est pas possible, du fait des interactions entre les composantes physiques et chimiques. Par exemple, le taux d'humidité hygroscopique influence beaucoup les résultats. Cette technique ne peut être mise en œuvre que dans des situations maîtrisées où les étalonnages sont disponibles. Le partage des courbes d'étalonnage réalisées par différents organismes (conseil, recherche, développement, laboratoires...) peut faciliter une utilisation à plus large échelle. En télédétection, ces types de capteurs ont une précision de l'ordre de 20%.

Avantages / limites :

Cette méthode peut produire des analyses rapides, nombreuses et peu coûteuses, sous réserve de la disponibilité des courbes d'étalonnage pour la situation mesurée. En particulier, la méthode peut permettre de

multiplier les mesures dans des situations où les étalonnages sont parfaitement maîtrisés pour diminuer les coûts d'analyse (notamment dans le cadre d'un réseau de suivi de l'évolution des stocks/concentrations ou teneurs de carbone). Pour la mise en place d'un suivi temporel, on peut envisager d'utiliser cette méthode pour une cartographie préalable de gradients éventuels et se servir de ces gradients observés pour optimiser une stratégie d'échantillonnage.

Par ailleurs, cette technique permet potentiellement d'analyser simultanément plusieurs propriétés : N total, C total, C organique et C minéral, taux d'argile, aire de la surface spécifique, CEC, humidité hygroscopique, taux de carbonate, etc. Enfin la mesure est non destructive.

Les développements de cette méthode s'attachent à mieux caractériser la qualité de la matière organique (carbone microbien, fractions, minéralisation de l'azote, etc.), ainsi qu'à utiliser les capteurs pour la cartographie et la caractérisation des sols (télédétection).

Cette méthode peut permettre à terme de diminuer les coûts. Elle sera utilisable à condition de ne pas trop dégrader la qualité des résultats.

Pour les mesures de terrain, il convient néanmoins d'être vigilant sur les interférences possibles selon l'humidité et la rugosité du sol et les mesures de terrain avec capteurs ne peuvent être mises en œuvre que lorsque le sol est nu.

Ces techniques présentent de grands potentiels de développement. Si la précision est bien maîtrisée, l'utilisation de ces techniques devrait progresser très vite dans les cinq ans qui viennent. Un enjeu majeur en termes de développement est de construire et partager la bibliothèque d'étalonnage pour les différentes situations autorisant ensuite la mesure en routine. Grande polyvalence de l'outil (pourrait potentiellement permettre à terme de faire de multiples mesures de nature différente avec un seul outil).

1.2.2. Méthode Rock-Eval (issue de la géologie)

Comment s'effectue la mesure :

Il s'agit d'une pyrolyse (combustion sous atmosphère sans oxygène) – et analyse des émissions de gaz C, H, O. Cette méthode permet d'identifier différents types de matière organique et les quantités de C, H, O associées à chaque fraction à partir des dégagements issus des différentes étapes de combustion à différentes températures.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Fait l'objet de travaux de recherche récents sur les sols. Permet d'estimer la quantité de carbone stable dans les sols à l'échelle du siècle. Potentiellement utilisable pour quantifier le rapport entre matières organiques stables et labiles dans les sols (Disnar *et al.*, 2003 ; Sebag *et al.*, 2006).

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

La méthode Rock-Eval est utilisée couramment pour l'étude des sédiments en géologie. Elle a

été conçue et développée à l'Institut français du pétrole (IFP) au milieu des années '70 pour évaluer la qualité pétrolière des roches fondées sur la pyrolyse de leur contenu carboné. C'est une méthode physico-chimique rapide d'étude de la matière organique sédimentaire, se basant sur la pyrolyse.

Les paramètres obtenus permettent :

- de caractériser la matière organique au plan de ses propriétés thermiques, et donc de déterminer des différentes fractions de propriétés thermiques différentes ;
- de quantifier la proportion de carbone organique dans les sédiments ou sols/

Les applications pour l'étude des matières organiques dans les sols à des fins agronomiques restent confinées au champ de la recherche. Les travaux récents menés à l'Irstea (Barré *et al.* 2016) montrent que cette méthode permettrait de quantifier la fraction stable (à l'échelle du siècle) du carbone.

La méthode doit être développée : prise en compte de l'impact des teneurs en Fe et K des sols sur le signal, établissement de la relation

comportement en pyrolyse / temps de résidence du C des matières organiques à établir sur un grand nombre d'échantillons.

Ces techniques sont encore au stade de la recherche mais présentent des potentialités fortes.

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats

A déterminer.

Avantages / limites :

Analyse rapide, coût faible (12 €/échantillon).
Méthode à développer.

1.3. Autres méthodes (non normalisées)

1.3.1. Pour analyser le C des sols

Carbone soluble

Il n'y a pas de norme pour cet indicateur, qui est très variable à l'échelle saisonnière. Un lien avec le carbone labile est difficile à établir (Balesdent, 1996). Aujourd'hui difficile à interpréter.

Carbone soluble à l'eau chaude

Il a été montré que le carbone extractible à l'eau chaude correspondait à une fraction labile des matières organiques du sol, de nature essentiellement polysaccharidique (Haynes *et al.* 2000, Haynes 2005).

Carbone labile et azote labile extractibles à l'autoclave

Il s'agit d'une méthode proposée par Lemaitre *et al.* (1995) et réalisée par plusieurs laboratoires. Le passage de l'échantillon à l'autoclave rend soluble la matière organique labile (5 à 10% N) (10 à 20% pour C supérieur à 50 microns). Elle permet de déterminer une fraction labile des matières organiques, issues pour l'essentiel du métabolisme microbien (processus de minéralisation-humification) et parfois appelée "métabolites. Ces matières organiques labiles (MOL) ont un taux de renouvellement beaucoup plus rapide que les matières organiques stables du sol (MOS).

Matières organiques oxydables au permanganate

Il s'agit d'une mesure par oxydation de la matière organique du sol au permanganate qui permettrait de quantifier un compartiment labile du carbone du sol (Weil *et al.* 2003). Cette méthode, peu coûteuse, est utilisée en Australie et aux USA (USDA). L'analyse de la sensibilité de cet indicateur donne cependant des résultats contrastés, celle-ci étant plus (Culman *et al.* 2012) ou moins sensible qu'une quantification des matières organiques particulaires (Skjemstad *et al.* 2006 ; Tirol-Padre et Ladha . 2004).

D'autres méthodes sont utilisées en recherche pour caractériser les matières organiques des sols. Elles donnent des renseignements sur leur origine, évolution, et sur les processus responsables de leur persistance : méthodes de caractérisation par hydrolyse ou oxydation, par extraction à l'aide de solvants, méthodes de quantification de classes de composés particuliers (par exemple glomaline), méthodes spectroscopiques (telles que la résonance magnétique nucléaire par exemple), méthodes de pyrolyse et méthodes de fractionnement physique (selon la taille ou la densité des particules ou des agrégats du sol). Ces méthodes ne sont pas décrites ici car elles relèvent des indicateurs de recherche tels que définis dans l'introduction.

Les méthodes d'extraction de substances humiques (acides fulviques, humiques, humine) ne sont pas abordées. En effet, l'évolution des connaissances a montré que ces caractérisations apportaient peu à la compréhension de la dynamique des matières organiques car elles sont entachées de multiples artefacts.

1.3.2. Méthode Hérody

Cette méthode, qui regroupe un ensemble de mesures de fractions organiques, développée par M. Hérody est utilisée par certains groupes d'agriculteurs, ne fait pas l'objet de publications scientifiques et n'est actuellement pas normalisée (Pérès *et al.* 2005).

2. MÉTHODES RELATIVES À L'ÉTAT BIOLOGIQUE DU SOL

L'état biologique du sol peut être appréhendé soit directement par l'observation des organismes ou de marqueurs de leur présence (ADN), soit par la mesure de leur activité (respirométrie, activité enzymatique). Des observations plus macroscopiques peuvent aussi fournir une appréciation qualitative de l'état biologique du sol. Les indicateurs relatifs à l'évaluation de l'écotoxicité des sols et des intrants ne sont pas détaillés ici.

Remarque générale sur l'interprétation des indicateurs d'état biologique⁶ :

- plusieurs niveaux d'analyse sont possibles : il peut s'agir de connaître la quantité d'organismes présents (ex : biomasse, nombre d'individus), leur diversité (ex : espèces présentes) ou bien leur contribution aux fonctions des sols (ex : dégradation de la matière organique) ;
- pour chaque indicateur, selon les cas, il peut s'agir de déterminer si l'on a suffisamment d'organismes « favorables » (plus on en a, mieux c'est) ou au contraire d'identifier la présence d'organismes « nuisibles » au regard de la production en surface (moins on en a, mieux c'est). Pour d'autres indicateurs, l'optimum se situe sur un intervalle donné, correspondant à un équilibre. Ces notions sont encore mal cernées pour la plupart des indicateurs. ;
- l'évaluation de la diversité des populations nécessite de déterminer, au-delà d'une quantité ou d'une biomasse globale, les familles ou les espèces des différents individus présents et leur nombre. Cette analyse plus complexe ne peut être réalisée sans une formation minimale pour l'identification visuelle des familles ou espèces ;
- de la même manière qu'il n'est pas possible de porter un diagnostic physique ou chimique avec un seul indicateur, il faut privilégier des batteries de bioindicateurs pour caractériser et suivre l'état biologique des sols ;
- les informations sur le milieu (climat, type de sol, usages, etc.) échantillonné sont systématiquement nécessaires pour interpréter les résultats et faire ainsi la distinction entre la variance due aux propriétés intrinsèques des sols et celles liées aux pratiques par exemple.

Les indicateurs biologiques (bioindicateurs) permettent de caractériser l'état et de révéler les modifications d'un écosystème (Blandin, 1986). Ils peuvent être utilisés avec les principaux objectifs suivants (Bispo et al., 2008) :

- décrire et surveiller la qualité du sol ;
- rendre compte de l'évolution des pratiques de gestion des sols ;
- déterminer la présence et le degré de risque des organismes nuisibles ;
- quantifier et surveiller la dégradation du milieu (par ex., risques écologiques de la contamination ou de la compaction des sols).

Selon l'organisme objet de l'analyse, les bioindicateurs sont regroupés en 3 types : faunistique, floristique⁷ et microbiologiques.

⁶ - Pour les méthodes biologiques, le tableau ajouté en annexe 1 a été élaboré dans le cadre de l'ouvrage Gessol

⁷ - Non développés ici, ils peuvent être mobilisés pour décrire qualitativement les sols forestiers

Bioindicateurs faunistiques :

- lombriciens ;
- [nématofaune](#) ;
- [microarthropodes du sol](#).

Bioindicateurs microbiologiques :

- respirométrie ;
- biomasse microbienne par fumigation ;
- [biomasse moléculaire microbienne du sol](#) ;
- minéralisation du carbone et de l'azote ;
- [activités enzymatiques](#) ;
- [diversité métabolique potentielle](#) ;
- [diversité taxonomique microbienne \(pyroséquençage\)](#).

Ce document traite un sous-ensemble **non exhaustif** des bioindicateurs faunistiques et microbiologiques⁸.

2.1. Bioindicateurs microbiologiques

Si l'on veut caractériser l'état microbiologique d'un sol, il est souhaitable de coupler systématiquement une mesure quantitative (ex : le C microbien par fumigation-extraction ou la biomasse moléculaire) à une mesure de diversité taxonomique (séquençage de l'ADN du sol) et d'activité (ex respiration, biolog...) car ces différents paramètres ne sont pas corrélés entre eux et cela donne une analyse du nombre d'individus microbiens, de leur variabilité et de leurs potentialités fonctionnelles.

2.1.1. Respiration du sol⁹

Ce qui est mesuré :

Le respiromètre mesure la minéralisation de la matière organique via le CO₂ produit et/ou l'O₂ consommé par la respiration microbienne du sol.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Il s'agit d'un indicateur de la biodégradabilité de la matière organique et de l'activité biologique.

Comment s'effectue la mesure :

En laboratoire (conditions contrôlées) à partir d'un échantillon de sol. Une des techniques de laboratoire utilise un capteur autonome de pression OXYTOP¹⁰, permettant de mesurer la cinétique de la respiration par la consommation d'O₂. Le CO₂ peut aussi être piégé au cours de l'essai avant d'être mesuré par titrage chimique.

10 - Marque déposée. WTW, Weilheim, Allemagne

⁸ - Pour aller plus loin voir par exemple <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php>

⁹ - Normalisation, cf le tableau annexé

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

La procédure et les outils sont normés. En revanche, cet indicateur n'est utilisé que par des bureaux d'étude ou par la recherche appliquée. Un référentiel global s'appuyant sur une base de données conséquente manque encore, hormis les résultats de la base de données « Bio 2 BD » (ADEME).

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats

Avantages / limites

Souvent couplé à la mesure de la biomasse microbienne.

Cette mesure donne la possibilité de quantifier le CO₂ global, avec en plus une vision cinétique de la respiration du sol. La méthode est relativement simple et les outils sont accessibles à tous¹¹.

Le coût d'investissement à l'achat est assez important. Par ailleurs les conditions d'humidité du sol sont un facteur perturbant pour la mesure (éviter les conditions d'anaérobiose). En outre, un référentiel national permettrait de développer l'application de la respirométrie pour le conseil.

11 - Il existe des tests-kits commercialisés aux USA pour le laboratoire ou le terrain), mais le coût reste assez élevé (mesures peu précises dans la version au champ).

2.1.2. Biomasse microbienne (méthode par fumigation-extraction)¹²

Ce qui est mesuré :

La méthode par fumigation mesure le carbone microbien, correspondant à 0,5 – 4% du C organique total du sol. Les paramètres qui peuvent être calculés sont par exemple le rapport entre le C microbien et le C total du sol.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Indicateur pour maraîchers, ou parfois pour les viticulteurs quand les autres paramètres analytiques ne donnent pas de réponse par rapport à un problème de fertilité. Le rapport C microbien / C total donne des indications sur l'occupation du sol (sol de prairie ou sol cultivé). Ce paramètre a été aussi étudié dans les systèmes de grande culture ; il répond à de nombreuses pratiques culturales : chaulage, apports de produits résiduels organiques, mise en place de couvert... et pourrait être utilisé pour évaluer l'état biologique dans ces systèmes.

Comment s'effectue la mesure :

La fumigation de terre brute par des vapeurs de chloroforme permet de détruire les cellules des

micro-organismes vivants. Le carbone organique contenu dans ces cellules est alors extrait : c'est le carbone microbien ou biomasse microbienne. Le résultat s'exprime en mg C microbien par kg de terre sèche mais également en pourcentage du C organique total du sol (généralement entre 0,5 et 4 % du C). La biomasse microbienne représente la fraction vivante des matières organiques (MOV).

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Cet indicateur est assez répandu dans le menu de laboratoires commerciaux. De nombreuses publications y font référence. Cependant le référencement reste encore assez sommaire et limite encore son utilisation pour le conseil.

Échelle de pertinence et les incertitudes sur les résultats :

Les laboratoires situent l'échantillon mesuré sur une échelle entre mini-maxi mais le conseil à partir de la mesure n'est pas trivial et dépend de l'existence d'un référentiel d'interprétation

12 - Normalisation, cf le tableau 6 annexé

utilisant les caractéristiques physico-chimiques du sol. L'utilisation de l'indicateur est souvent liée à des préconisations d'utilisation de produits de stimulation microbienne. L'indicateur montre une sensibilité pour les types de sol, le climat et les apports récents de matières organiques.

Avantages / limites :

Peut être lié à d'autres mesures : lié à un pool de carbone, l'indicateur peut « donner une idée du moteur par rapport à la taille de la voiture ».

Le référencement reste à partager et consolider entre les différents laboratoires mettant en œuvre cette mesure.

Les périodes de prélèvement qui prennent en compte l'histoire récente en termes de restitutions organiques et de travail du sol, doivent être respectées ainsi que le protocole de conservation des échantillons (mesures sur les échantillons frais).

2.1.3. Activité enzymatique (ex : essais Biolog et autres analyses individuelles)

Ce qui est mesuré :

De nombreuses méthodes sont disponibles pour mesurer les activités microbiennes (bactériennes et fongiques) liées à la dégradation de la matière organique et à l'acquisition de nutriments dans les sols. Elles diffèrent par la nature des substrats utilisés, les conditions opératoires, le temps d'incubation et les méthodes de détection (colorimétrie, fluorimétrie ou radiomarquage). Les substrats sont hydrolysés par un très large spectre d'enzymes (acétyl-estérases, estérases, lipases, protéases).

Des méthodes existent pour mesurer spécifiquement des activités d'enzymes intracellulaires ou extracellulaires produite par la biomasse microbienne des sols.

En jouant sur les substrats et les conditions d'incubation, on peut cibler des activités enzymatiques liées aux cycles biogéochimiques (carbone, azote, soufre, phosphore, ...). qui mobilisent des enzymes identifiées (par exemple : α -glucosidase, uréase, arylsulfatase, phosphatases, estérases, laccases...) de type hydrolase ou oxydoréductase.

Les analyses de la fluorescéine diacétate (FDA) mesurant l'ensemble des estérases extra et intracellulaires ou de la déshydrogénase (DHA) sont plus intégratrices de l'activité microbienne totale.

D'autres méthodes existent pour l'évaluation de la diversité catabolique des communautés microbiennes des sols, basées sur la capacité à oxyder et dégrader un substrat carboné.

C'est le cas de la méthode commerciale Biolog®, qui repose sur l'utilisation de tests dits cataboliques, mesurant l'activité de dégradation (oxydation) de divers substrats par la fraction cultivable de la communauté microbienne, dans les conditions du test. Cette technique Biolog® nécessite un calibrage de la concentration bactérienne du sol avant la mise en incubation de l'extrait du sol avec les substrats dans les microplaques. Elle permet de déterminer une activité métabolique globale (AWCD). Basé sur le même principe, mais plus réaliste, car sans extraction des microorganismes, et plus exhaustif de l'activité microbienne catabolique total du sol, une méthode de microrespirométrie (Microresp®) est en développement.

Dans ces deux bio-essais, seules les capacités à dégrader les substrats sont mesurées mais il n'y a pas d'identification précise des enzymes mises en jeu pour ces activités.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Ces mesures permettent d'évaluer un aspect de la biodiversité fonctionnelle des sols et/ou leur potentiel de dégradation catabolique. Elles permettent de rendre compte de l'activité réelle des bactéries et champignons et leur participation à la dégradation de la matière organique ou au recyclage des nutriments dans les sols. L'effet des pratiques culturales est mis en évidence par les combinaisons des activités enzymatiques avec d'autres indicateurs. À l'issue du projet bioindicateurs ADEME, il a été montré que les rotations culturales, le travail du sol, les amendements organiques ou encore les contaminations chimiques ont un effet significatif sur les activités enzymatiques

(hydrolases et AWCD). Les activités microbiennes permettent de discriminer des modalités de pratiques culturales (couvert, choix d'espèces, couverts intermédiaires - WCP, indice de variabilité grande culture mis au point par Chaussod) mais la traduction de ces constats en préconisations de gestion des parcelles reste à établir.

Certaines activités et capacités cataboliques sont prometteuses pour le développement de bio-essais écotoxicologiques afin d'évaluer les effets de certains contaminants dans les sols (exemple : métaux, pesticides, antibiotiques). La FDA, comme indicateur d'activité métabolique, est bien corrélée avec la biomasse microbienne, et rend bien compte de l'apport de matières organiques.

Ces méthodes sont surtout utilisées dans le cadre de projets de recherche ciblés, notamment pour mettre en évidence l'effet de l'apport d'amendements organiques sur les sols ou l'évaluation de l'impact des contaminants chimiques.

Comment s'effectue la mesure :

D'une manière générale il est toujours préférable d'utiliser des échantillons de sol frais, qui ont été prélevés et préparés quelques jours seulement avant la mesure. La méthode de laboratoire utilise une suspension de sol dans l'eau ou dans un tampon, contenant les enzymes actives et/ou les microorganismes. Incubés en présence des substrats adéquats dans des micro-plaques préparées à façon au laboratoire (par exemple cycles biogéochimiques) ou commercialisées (Biolog®) pour suivre un ensemble d'activités. La méthode Microresp® utilise du sol frais auquel est mélangé le substrat.

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Les normes ISO existent ou sont en cours de développement pour la mesure des certaines activités enzymatiques. Des laboratoires réalisent ces mesures en routine. Au niveau de la recherche académique, plusieurs laboratoires réalisent ces mesures dans le cadre majoritaire de projets de recherche. Au sein de l'UMR Ecosys, la plate-forme de biochimie environnementale (Biochem-Env, <https://www.biochemenv.fr/>) est un acteur majeur. Son objectif est, outre le développement, la standardisation et

l'automatisation des protocoles de mesure des activités enzymatiques, le développement d'un référentiel l'interprétation des résultats et la création d'indices. La plateforme porte au niveau international la normalisation ISO de plusieurs protocoles.

Certaines micro-plaques disponibles sur le marché ont été développées pour une application environnementale (biodégradabilité de certaines substances polluantes notamment). Le développement de plaques spécifiques pour les enjeux agricoles est en cours.

Un indice multienzymatique permettra de répondre aux questions agronomiques et environnementales et de pallier le manque actuel de référentiels pour le conseil.

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

Les résultats ne sont pas simples à utiliser au-delà du seul constat de la présence d'une activité (discrimine par exemple des sols avec ou sans couvert végétal). Les résultats peuvent être utilisés à l'échelle de la parcelle si les échantillons sont accompagnés par des informations sur le contexte environnemental (type de sol, climat, pratiques etc.).

Avantages / limites :

La vision d'ensemble sur des cycles de dégradation de la matière organique est l'avantage principal de ce type de mesure. Ces méthodes de mesure peuvent ne mobiliser qu'une partie des activités enzymatiques du sol. Toutefois, en considérant plusieurs activités enzymatiques et substrats différents, ces mesures, permettent d'appréhender le fonctionnement des cycles biogéochimiques des sols liés au recyclage des nutriments pour les cultures, ce qui est prometteur à terme.

La sensibilité et la sélectivité des substrats permet de différencier les activités et de discriminer même les faibles niveaux. Les méthodes sont relativement simples à mettre en œuvre et peu coûteuses. Elles devraient toutes pouvoir être automatisées à court terme.

Cependant, le manque de mesures réalisées avec des protocoles standardisés ou normalisés dans des contextes différents, incluant des situations de référence, limite encore la mise à disposition d'un référentiel d'interprétation des résultats pour un conseil

efficace. Par ailleurs, les variables environnementales ont une influence importante sur les paramètres. Ces informations (texture du sol, pH, matière organique, etc.) sont nécessaires pour l'interprétation des résultats.

Même si la valeur moyenne de l'activité n'est pas intéressante en raison de ces limites, la cartographie des substrats les plus dégradés par la méthode Biolog® est intéressante pour une interprétation agronomique.

2.1.4. Biomasse moléculaire microbienne du sol

Pour plus de détails voir :
https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/download/fiches-outil/fiche_outil_10_biomasse_moleculaire.pdf

L'indicateur décrit ci-dessous correspond à celui publié sur le site de l'ONB
<http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-biomasse-microbienne-des-sols-en-metropole>.

Ce qui est mesuré :

La biomasse microbienne est mesurée, grâce à une estimation de la quantité d'ADN microbien extrait. Le résultat est exprimé en µg d'ADN par gramme de sol. La plupart des sols analysés ont des concentrations situées entre 10 et 100 µg/g.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Permet de comparer des sols et des traitements entre eux (donne le reflet des populations présentes). Les sols les plus riches en ADN microbien sont situés en Lorraine et en Champagne-Ardenne et dans les massifs montagneux.

La distribution géographique de la richesse en biomasse microbienne est liée à la texture des sols, leur teneur en carbone organique et en azote, leur pH et à l'occupation et l'usage du sol. Les plus faibles biomasses microbiennes se rencontrent sur les sols très acides et sableux alors que les abondances les plus élevées correspondent à des sols riches en carbone organique, à pH élevé et argileux.

Comment s'effectue la mesure :

Extraction de l'ADN selon le protocole développé par la plateforme Genosol¹³ (Horrigue *et al.* 2016).

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Un référentiel d'interprétation existe à ce jour et est basé sur l'analyse des sols du RMQS (2200 sols à l'échelle nationale). Un modèle statistique prédictif permet d'obtenir une valeur de référence de la biomasse moléculaire microbienne pour un type de sol donné. La comparaison avec la valeur mesurée permet d'émettre un diagnostic précis de l'impact du mode d'usage du sol sur l'abondance microbienne (Horrigue *et al.* 2016).

Potentiel très fort de développement en routine à échéance de 5 ans (utilisé par exemple dans les projets CASDAR AgrInov et SysVit-SolVin, le projet Entretien du sol financé par l'Agence de l'Eau Rhin Meuse...). Le projet CASDAR Microbioterre qui va démarrer utilisera aussi ces indicateurs. Un projet est en cours de dépôt pour industrialiser différents modes opératoires concernant les bioindicateurs (Projet Agroécosol). Pour la description des projets, voir en partie 5.

Échelle de pertinence et les incertitudes sur les résultats :

Cette méthode quantifie ensemble indifféremment l'ADN des organismes vivants du sol avec celui d'organismes morts dont l'ADN n'est pas encore dégradé. La variabilité intra-annuelle peut être importante mais en général, les traitements restent toujours différenciés entre eux.

13 - https://www2.dijon.inra.fr/plateforme_genosol/eq_uipe

Avantages / limites :

La biomasse moléculaire microbienne donne une idée de l'abondance des communautés

microbiennes totale, mais pas de la diversité des espèces qu'elle renferme.

2.1.5. Diversité taxonomique microbienne

Pour plus de détails voir : <http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-biodiversite-bacterienne-des-sols>

Ce qui est mesuré :

La diversité bactérienne est évaluée par le séquençage massif de l'ADN des microorganismes des sols. Cette technologie permet de caractériser la diversité bactérienne et de champignons dans sa totalité (nombre et inventaire des espèces présentes).

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Essentiellement la recherche à l'origine. Cette mesure est de plus en plus associée à celle de la biomasse moléculaire microbienne pour finaliser un diagnostic complet de la qualité microbiologique des sols. Permet d'identifier la proportion des différents groupes microbiens présents dans le sol (champignons et bactéries). Permet de comparer des sols et des traitements entre eux (donne le reflet des populations présentes). La diversité microbienne varie en fonction du type de sol mais aussi des pratiques, contamination, etc. avec des conséquences sur le fonctionnement biologique du sol : fertilité biologique, barrière aux espèces invasives (pathogènes), turnover des matières organiques, changement climatique, etc.

Comment s'effectue la mesure :

Séquençage des gènes ribosomiques des bactéries et des champignons directement à partir de l'ADN extrait du sol (Terrat *et al.* 2015)

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Indicateur au stade recherche et en cours de transfert d'un point de vue opérationnel. Il existe un référentiel national (les échantillons du RMQS ayant été analysés avec ces

méthodes). Les référentiels sur les bactéries sont plus nombreux que ceux sur les champignons. Un indicateur de biodiversité bactérienne a été intégré au sein de l'Observatoire National de la Biodiversité¹⁴.

Les bases de données s'enrichissent et devraient permettre d'avancer sur l'interprétation des résultats.

Comme pour la biomasse moléculaire microbienne, un modèle statistique prédictif a aussi été développé pour comparer les valeurs de référence avec les valeurs mesurées.

Le potentiel de développement en routine est très fort à échéance de 5 ans (utilisé par exemple dans les projets CASDAR AgrInov, REVA et SysVit-SolVin, le projet Entretien du sol financé par l'Agence de l'Eau Rhin Meuse...). Le projet CASDAR Microbioterreutilisera aussi ces indicateurs ainsi qu'un projet en cours de dépôt pour industrialiser différents modes opératoires concernant les bioindicateurs. Ces projets sont décrits en partie 5..

Fort potentiel en termes d'indicateurs et de diagnostic biologiques, en cours de transfert aux agriculteurs via les projets CASDAR AgrInov et plus largement aux laboratoires d'analyse (projet PIA AgroEcoSol).

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

En fonction des amorces choisies, il est possible de quantifier globalement les populations de bactéries ou de champignons mais également, de quantifier des populations plus spécifiques¹⁵. Cette méthode quantifie

14 - <http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-biodiversite-bacterienne-des-sols>

15 - voir pour plus de détails https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/download/fiches-outil/fiche_outil_12_diversite_taxonomique_microbienne.pdf

ensemble indifféremment l'ADN des organismes vivants du sol avec celui d'organismes morts dont l'ADN n'est pas encore dégradé (« fantômes »). La variabilité intra-annuelle peut être importante mais en général, les traitements restent toujours différenciés entre eux.

NB : La richesse bactérienne n'est pas corrélée à celle des autres composantes de la diversité microbienne du sol (champignons notamment). Une richesse bactérienne élevée peut s'accompagner d'une richesse en champignons faible (dans les sols agricoles par exemple).

Avantages / limites :

Ces outils présentent une meilleure exhaustivité pour caractériser les populations présentes (moins de 5% des populations microbiennes peuvent être mises en culture par les méthodes traditionnelles). L'identification précise des populations bactériennes est possible mais cela

nécessite des analyses bio-informatiques plus poussées et dépend de l'état de connaissance au niveau des bases de données internationales. La méthode peut permettre de cibler certaines activités des populations mais cela demande des connaissances sur les gènes à rechercher (ex : cycle de l'azote). La valorisation de la mesure a été évaluée dans le projet AgrInnov 2012-15, qui a analysé 120 parcelles en grandes cultures et 120 parcelles en viticulture pour voir si l'indicateur pouvait différencier certaines pratiques et donc être valorisé en conseil.

Remarque importante : la technique est en essor très rapide, elle permettra très probablement à échéance 5 ans d'effectuer des analyses en routine à un prix très attractif, y compris au-delà des seuls bactéries et champignons (invertébrés du sol). Il sera sans doute également possible d'aller beaucoup plus loin en routine dans l'identification et la quantification de ces communautés.

2.2. Bioindicateurs faunistiques

2.2.1. Lombriciens

Les vers de terre, également appelés lombriciens, sont des organismes invertébrés du sol connus de tous et sont reconnus comme ingénieurs du sol par leurs rôles dans diverses fonctions des sols (décomposition et transfert de la matière organique, stimulation des activités microbiennes, agrégation et structuration des sols, infiltration des fluides et rétention en eau, ...).

Les conséquences de ces bioturbations lombriciennes permettent, entre autres, la réduction de l'érosion, l'augmentation de la production végétale ainsi que la réduction des risques de pollution.

Ce sont des bioindicateurs reconnus et pertinents en termes d'indicateurs d'impact sur le fonctionnement des sols et de réponse rendant compte de l'état des sols, de leur occupation et des modes de production ainsi que de l'évolution des pratiques de gestion. Ils sont utilisés dans des réseaux de surveillance nationale¹⁶, des réseaux de développement (OAB, VigieNature, Natureparif, ...) et des réseaux de recherche (SOERE, BioDiversa, ...).

Ce qui est mesuré :

L'abondance totale et l'abondance fonctionnelle selon 4 groupes écologiques de lombriciens est mesurée directement au terrain.

Après analyses au laboratoire = (1) certification des dénombrements effectués au terrain, (2) abondance taxonomique, richesse et indices de diversité, occurrence, assurance écologique, résilience, impacts fonctionnels, ...

Dans le cadre de l'OPVT (Observatoire Participatif de Vers de Terre), des protocoles sont proposés selon l'objectif et le niveau d'implication des observateurs.

16 - <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page.php?49;http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/biodiversite-specifique-des-vers-de-terre>

Les paramètres fournis par ce bio-indicateur sont :

- globaux : abondance (nb individus/m²) et biomasse (g/m²) totales,
- fonctionnels : abondance par groupes (de 3 à 8 groupes)
- taxonomiques : richesse¹⁷ (nombre de taxons différents), indices de diversité¹⁸ et d'équitabilité¹⁹ (importance relative des espèces), occurrence, assurance écologique,

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Selon les protocoles, les informations peuvent être utilisées dans un but pédagogique, pour le conseil agricole ou pour la recherche.

Cet indicateur est utilisé dans plusieurs projets de recherche en cours, visant notamment à établir un lien entre ces bioindicateurs et le carbone du sol, l'utilisation des pesticides ou d'autres pratiques agricoles.

Publics : agents de développement agricole, agriculteurs, enseignants, responsables des fermes des lycées agricoles, gestionnaires d'espaces naturels ou urbanisés, ...

Objectifs : (1) évaluation de la qualité biologique des milieux, (2) outils d'aide à la décision (agriculteurs, bureaux d'études, ...), (3) outil pédagogique (formation), (4) acquisition de connaissances et références sur les lombriciens, (5) veille technique pour orienter de futures recherches, ...

17 - La richesse taxonomique est le nombre de taxons différents au sein d'une communauté.

18 - La diversité est exprimée par différents indices (Shannon, Simpsons, etc.).

19 - L'équitabilité au sein d'une communauté évalue la répartition du nombre des individus par espèce. La valeur est proche de 1 quand la répartition est régulière il n'y a pas d'espèces dominantes.

Comment s'effectue la mesure²⁰ :

Le protocole normalisé utilise le formol pour faire remonter les vers de terre à la surface (norme ISO 23611-1). Toutefois la plupart des scientifiques utilisent d'autres molécules irritantes – solution d'allyl isothiocyanate en particulier -. Dans l'un des protocoles participatifs ou collaboratifs, le formol est remplacé par de la moutarde qui provoque la remontée des lombriciens à la surface et permet leur observation (comptage et reconnaissance). Un autre protocole est combiné au Test Bêche Structure (ISARA Lyon) permettant ainsi une évaluation globale des sols au terrain par les gestionnaires.

La mesure peut être faite par tout public avec support documentaire en ligne²¹ ; une démarche collaborative est aussi proposée comprenant une session de formation, des analyses taxonomique et écologique des données renvoyées au laboratoire par les participants, une restitution en présentiel des données globales du groupe et des données individuelles à chaque participant²².

Les remontées d'informations collaboratives par différents groupes et/ou programme sont en moyenne annuelle de 300 à 600 (soit 2150 depuis 2014) auxquelles s'ajoutent celles effectuées de manière participative (150 à 300/an).

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Méthode en ligne et appliquée dans le cadre de plusieurs observatoires nationaux et européen.

Nécessité d'un cycle de formation préalable. Après analyses au laboratoire, envoi de fiches de restitution avec interprétation des résultats²⁰.

Passage au conseil pas encore franchi.

Cet observatoire répond au besoin d'un outil de dialogue entre les acteurs des sols, agriculteur - agent de développement - chercheur. Il est développé dans plusieurs programmes²³. L'utilisation de ces méthodes par le

développement agricole est non négligeable mais le conseil reste encore marginal.

Les méthodes citées sont utilisées dans plusieurs observatoires des sols agricoles (développement, surveillance, recherche).

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

Au terrain, on constate une erreur minimale de 20 à 30% des identifications de groupes après apprentissage pour des observateurs non spécialisés. L'erreur est de l'ordre de 60 % de l'identification des différents groupes pour des utilisateurs non formés.

Après analyses au laboratoire, certification à 100% des données.

Avantages / limites :

Indicateur simple à mettre en œuvre, pédagogique et réalisable par les groupes d'agriculteurs avec leur animateur, des enseignants avec leur classe ou des agents de bureaux d'études (en zones agricoles ou non-agricoles, dans les zones aéroportuaires par ex.).

Pour assurer une mobilisation des groupes d'agriculteurs sur le moyen terme, nécessité d'un retour régulier des données associé à un diagnostic établi en relation avec leur(s) question(s) de départ.

Un indicateur spécifique aux lombriciens ne peut donc pas à lui seul définir le statut du sol au regard de sa biodiversité mais comme ils sont reconnus ingénieurs de l'écosystème, ces organismes s'avèrent intégrateurs de processus écologiques sous-jacents (cf introduction du paragraphe), ce qui permet d'associer l'évolution de leur abondance et de leur composition taxonomique à l'évolution de processus écosystémiques auxquels ils contribuent.

La mesure est contrainte par les périodes et les conditions du milieu (sol non gelé, trop humide, période d'activité des lombriciens etc.). Un effet lié au préleveur sur le tri manuel est augmenté pour les individus de très petite taille.

20 - <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/quel-protocole-choisir>

21 - <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page.php?65>

22 - <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/fiches-de-restitutio>

23 - <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/la-recherche>

2.2.2. Nématofaune

Les nématodes du sol sont des vers microscopiques (de l'ordre d'1 millimètre de longueur). Le terme nématofaune définit la communauté des nématodes libres vivant dans le sol.

Ce qui est mesuré :

La méthode consiste en un comptage des organismes et leur identification.

Sur la base de la composition et de l'abondance de la nématofaune du sol, des indices suivants sont calculés :

- SI : Indice de Structure qui reflète la stabilité du milieu, plus il est élevé moins le milieu est perturbé. Il est fonction de l'abondance relative de plusieurs familles (les bactérivores, les fongivores, les omnivores et les prédateurs) ;
- EI : Indice d'Enrichissement qui donne une indication sur la dynamique des éléments nutritifs. Cet indice est particulièrement utile dans les agrosystèmes. L'EI augmente avec la disponibilité en nutriments, et en particulier l'azote.

Trois autres indices, le MI (Indice de Maturité), le PPI (Indice des nématodes phytophages) et le IVD (Indice des Voies de Décomposition de la matière organique) sont également utilisés pour déterminer l'effet de différentes perturbations, stress, ou pratiques sur le sol.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Les nématodes peuvent être utilisés en tant que bioindicateurs d'effet ou d'impact. En effet, les nématodes ont une diversité très importante, allant des phytophages (dont ceux limitant la production), à ceux impliqués dans la dynamique de la matière organique, le recyclage des nutriments et des polluants (bactérivores, carnivores, fongivores, omnivores, etc.). À part leur rôle clé dans la chaîne trophique, ils sont importants en tant qu'indicateurs du fait de leur sensibilité aux conditions du milieu et aux perturbations physiques et chimiques.

Les questions auxquelles les indicateurs de la nématofaune peuvent répondre sont donc très

variées, allant de l'évolution des sites contaminés à l'impact des pratiques agricoles.

Comment s'effectue la mesure :

Les prélèvements s'effectuent comme pour un analyse de sols classique. On procède ensuite à une extraction par lavage puis à un comptage à l'œil (extraction et caractérisation de l'ADN possible ultérieurement : barcoding, cf. 2.3.2).

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Un laboratoire privé effectue des analyses de routine des nématodes communs et pathogènes.

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats

Actuellement le référentiel utilisé pour l'interprétation des résultats est disponible auprès du laboratoire qui effectue les analyses de routine. Des référentiels locaux sont nécessaires pour interpréter les résultats de manière plus fine. En effet, la potentialité de ces indicateurs s'exprime par rapport à des études synchronisées (avec un témoin) ou avec des études diachroniques (évolution dans le temps).

Avantages / limites :

Il existe une base de données qui permet de réaliser des diagnostics mais assez peu de spécialistes en France (un seul bureau d'étude).

Les limites de la méthode sont liées à la fois au protocole d'échantillonnage et d'analyse (échantillon frais) et à l'impact des différents facteurs sur les indicateurs qui rendent l'interprétation difficile dans les cas d'études multifactorielles (ou des études système). Néanmoins, une seule analyse des nématodes donne plusieurs indicateurs et donc plusieurs niveaux d'informations. En outre, les indicateurs sont relativement simples d'interprétation et ils sont très sensibles aux changements de pratiques et de milieu.

2.2.3. Enchytréïdes²⁴

Présents dans la plupart des sols du Monde, les enchytréïdes sont des Annélides Oligochètes, au même titre que les vers de terre. Ils appartiennent à la mésofaune du sol (100 µm à 2 mm de diamètre).

Les enchytréïdes sont impliqués dans la dégradation de la matière organique du sol. Dotés d'une faible efficacité d'assimilation, ils ingèrent de grandes quantités de matière organique. Ils sont également impliqués dans l'évolution de la structure des sols en raison de leur comportement fouisseur, des boulettes fécales qu'ils produisent et du transport, de l'ingestion et du mélange des particules minérales et organiques du sol. Ils influencent donc la porosité du sol, réduisant ainsi le compactage et augmentant la conductivité hydraulique et la concentration en oxygène dans les sols. Ils peuvent également influencer le développement de champignons phytopathogènes du sol.

Les indicateurs mesurés par la méthode sont :

- Abondance des différentes espèces (nb individus/m²);
- Abondance et diversité des groupes fonctionnels : stratégies r et k.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Les enchytréïdes sont des indicateurs de stress chimiques dans les écosystèmes terrestres et des pratiques agricoles dans les agroécosystèmes.

La méthode est appliquée par relativement peu de laboratoires de structures de recherche en France. Ces indicateurs ne sont utilisés que dans le cadre de projets de recherche.

Comment s'effectue la mesure :

Les prélèvements d'enchytréïdes en conditions naturelles s'opèrent à l'aide un carottier (Ø d'environ 5 cm) permettant de prélever des échantillons à différentes profondeurs (par tranches de 5 cm d'épaisseur généralement). Les enchytréïdes sont ensuite extraits du sol au laboratoire, à l'aide un entonnoir rempli d'eau et d'une lampe incandescente (O'Connor, 1955) (les enchytréïdes fuient la lumière et la chaleur) ou tout simplement d'une passoire dans laquelle la carotte de sol est immergée pendant plusieurs jours (ISO 23611-3, 2007).

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

Les enchytréïdes peuvent être prélevés sur le terrain ou utilisés dans des expérimentations en laboratoire. L'échelle d'étude sur le terrain est généralement la parcelle expérimentale. Des informations sur les conditions pédoclimatiques (ex. pH, humidité, texture, taux de matière organique), l'usage des sols et les pratiques liées à ces usages sont fondamentales pour l'interprétation des résultats.

Avantages / limites :

Les avantages de cet indicateur sont la facilité de prélèvement sur le terrain et son coût global faible. Le principal inconvénient est la difficulté d'identification des individus à l'espèce, qui nécessite une expertise fine. En effet, ceux-ci doivent être identifiés vivants sous microscope, grâce principalement à des organes internes. L'interprétation des résultats demande une expertise spécifique qui est très peu répandue sur le territoire actuellement. La multiplicité et la complémentarité des paramètres mesurés facilitent son interprétation.

2.2.4. Microarthropodes du sol²⁵

24 - <https://www6.versailles-grignon.inra.fr/ecosys/Page-d-accueil/Actualites/Les-enchytreides>

<http://www.versailles-grignon.inra.fr/Toutes-les-actualites/2017-Enchytreides>

25 - https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/download/fiches-outil/fiche_util_8_microarthropodes_du_sol.pdf

Les microarthropodes du sol sont définis ici comme les Acariens et les Collemboles. Ils partagent une taille très réduite à l'état adulte (inférieure à 1 mm).

Les indicateurs mesurés par la méthode sont :

- abondance des taxons (nb individus/m²) :
 - Acariens : Oribatida, Gamasida et Actinedida ;
 - Collemboles : par espèce ;
- abondance, richesses et diversité des groupes fonctionnels (nb individus/m²) :
 - Collemboles : épi- hémi- et eu-édaphiques en fonction de critères morphologiques.

13 paramètres biologiques en sortie donnent des informations sur : abondance de chacun des 3 groupes d'acariens (Actinedida, Oribatida, Gamasida), abondance totale des collemboles, abondance de chacun des 3 groupes fonctionnels de collemboles (épi- hémi- et eu-édaphiques), abondance totale des acariens, abondance des « autres Arthropodes », abondance totale de microarthropodes, richesse en espèces de Collemboles, indice de structure des Collemboles (indice de Shannon).

Qui l'utilise et pour quel objectif

Acariens et Collemboles sont des décomposeurs de la matière organique et des régulateurs des processus de décompositions en lien avec les autres organismes décomposeurs. Leur présence est essentiellement liée à la matière organique, déterminant les réseaux trophiques dans les sols.

Cet indicateur est souvent couplé à la mesure de la biomasse microbienne.

Comment s'effectue la mesure :

Voir annexe 1 : normes pour les Collemboles et les Acariens.

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats

La méthode est appliquée par plusieurs laboratoires de structures de recherche.

Ces indicateurs ne sont utilisés que dans le cadre de projets de recherche.

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

L'échelle pour l'utilisation de ces indicateurs est tant la parcelle expérimentale que le territoire. En revanche les informations sur les conditions pédoclimatiques (pH, structure, texture), l'usage des sols, les pratiques liées à ces usages, la végétation environnante sont fondamentales pour l'interprétation des résultats.

Avantages / limites :

Les avantages de cet indicateur sont la facilité de mise en œuvre et son coût global faible. La multiplicité et la complémentarité des paramètres mesurés facilitent également son interprétation. Cependant, il faut une expertise fine pour pouvoir les identifier, prélever en frais et analyser assez vite. L'interprétation des résultats demande une expertise spécifique qui n'est pas très répandue sur le territoire actuellement.

2.3. Indicateurs complémentaires

2.3.1. Test bêche

Ce qui est mesuré :

Le test bêche permet d'observer l'état structural du sol avec un diagnostic simplifié, inspiré du profil cultural (Gautronneau et Manichon, 1987). D'autres diagnostics simplifiés existent, comme l'utilisation d'un pénétromètre, le drop test ou le miniprofil « télescopique ».

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Conseiller terrain pour l'observation pédagogique, exploitant agricole, toute personne désireuse de porter un premier regard sur un sol. Ce test est utile pour la comparaison de pratiques agricoles impactant la stabilité structurale (résistance de la structure, porosité et donc circulation de l'eau et de l'air).

Comment s'effectue la mesure :

La réalisation de ce test est simple et peu destructive. Le test consiste à prélever, à l'aide d'une bêche, une bêchée à observer. Il s'agit d'examiner d'abord la tenue du bloc de terre prélevé puis, en fractionnant progressivement le bloc, d'observer les racines, les cailloux, la terre fine, les mottes et leur mode d'assemblage. L'observation de la tenue du bloc sur la bêche puis sur la bêche permet de définir le mode d'assemblage des mottes, c'est-à-dire de caractériser la structure. La détermination des différents types de mottes et de leur abondance en pourcentage permet d'établir une classe de tassement de 1 (structure du sol ouverte, très poreuse) à 5 (structure compactée, peu de porosité). Pour identifier les mottes, il faut regarder leur surface, leurs arêtes et leur porosité (pores et racines). Afin de pouvoir partager les observations, une nomenclature a été mise en place à partir du profil cultural.

L'observation de la structure du sol peut être complétée par une observation des lombriciens

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Bonne acceptabilité de la méthode qui est très opérationnelle. Plusieurs protocoles existent pour la mise en place du test bêche (par exemple Boizard, 2013). En France, l'ISARA-Lyon a développé un protocole et une variante pour les lombriciens. Les protocoles sont en constante évolution et des protocoles similaires existent actuellement en Europe.

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

Les résultats peuvent être utilisés pour comparer des modalités différentes d'un même essai (témoin). Un effet de l'opérateur peut être observé. Par ailleurs, les résultats de ce test sont à mettre en relation avec ceux d'autres indicateurs du sol (physiques, chimiques et biologiques).

Avantages / limites:

L'avantage principal du test réside dans la simplicité opérationnelle et de compréhension des résultats. En revanche le diagnostic peut être compliqué du fait de l'implication d'un grand nombre de facteurs sur l'état structural d'un sol, nécessitant une certaine expertise/pratique.

Par ailleurs, ce test est un outil pédagogique et de communication : il permet une discussion terrain très pédagogique et une première identification de la structuration physique du sol et des communautés biologiques observables à l'œil nu.

2.3.2. Indicateur à venir sur l'ensemble de la biodiversité du sol : le metabarcoding

Le metabarcoding, un outil permettant d'évaluer la qualité des sols.

L'ADN environnemental provenant des êtres vivants ou morts présents actuellement ou dans le passé (mais ADN en faible quantité dans ce cas) dans le sol peut être :

(1) prélevé avec des méthodes d'échantillonnage standardisées quel que soit le milieu (champ cultivé, prairie, forêt, sols pollués) ;

(2) extrait avec des techniques également standardisées et massives (plusieurs centaines d'échantillons simultanément) ;

(3) et amplifié en utilisant des couples d'amorces universelles ciblant certains groupes taxinomiques (Eucaryotes, plantes, insectes, collemboles, vers de terre, fonge, procaryotes...).

Le séquençage massif permet d'obtenir des dizaines (centaines) de millions de séquences d'ADN que les outils de la bio informatique (Obitools par ex.) vont assigner à des groupes taxinomiques, à partir de bases de références publiques (Genbank par ex.). On peut améliorer la définition de l'identification en utilisant des bases locales (cas des plantes par ex.).

Selon les couples d'amorces choisis, on peut obtenir la composition qualitative et quantitative pour un groupe taxinomique. L'utilisation d'un marqueur moléculaire à "spectre large" tel que le "18S" permet d'obtenir la proportion des différents taxons vivant dans un sol (au niveau phylum, classe et ordre), Le marqueur spécifique des vers de terre conduit lui, à une identification au niveau de l'espèce. Les marqueurs eucaryotes ou insectes présentent l'avantage de donner une « image » correspondant à une réalité connue, même partiellement, alors que notre méconnaissance de l'écologie des procaryotes et de la fonge rend difficile l'interprétation des résultats.

Les premiers résultats montrent, à l'aide d'analyse multidimensionnelles, qu'il existe une excellente relation entre la biodiversité et les pratiques mises en oeuvre dans un milieu (fauche, plantation, assèchement, culture...).

Le metabarcoding est donc un outil prometteur, standardisé, pouvant être automatisé à brève échéance (prélèvement, extraction, séquençage), donnant une vision globale ou ciblée de la biodiversité du sol et dont les coûts en baisse rendront la technique abordable.

Il reste à développer une expérimentation à grande échelle afin d'obtenir une base de sols de références analysés par cette technique en utilisant par exemple le marqueur 18S, ciblant les plantes, les champignons, les invertébrés... et donnant une vision globale de la biodiversité.

2.4. Indicateurs indirects

2.4.1. Indicateur relatif à la stabilité structurale des sols

Ce qui est mesuré lorsqu'il s'agit d'une méthode de mesure, ou ce qui est estimé :

Cette méthode apprécie la stabilité des agrégats du sol et donc indirectement un

résultat relatif à l'état organique du sol puisque la stabilité structurale est très liée à la matière organique pour un même type sol.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Utilisé par certains conseillers pour sa valeur pédagogique.

Avantages / limites :

Comment s'effectue la mesure ou l'estimation :

Observation de la stabilité structurale par tamisage à l'eau (ce tamisage simule l'effet d'une pluie).

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Non normalisée, cette méthode est très sensible et très parlante pour les agriculteurs,

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

Il existe des interférences fortes avec d'éventuelles variations de pH.

2.4.2. Litter-bag, tea bag, bait lamina

Ce qui est mesuré :

La dégradation des matières organiques par les organismes du sol en mesurant la perte de masse de matière végétale après séjour sur ou dans le sol, éventuellement associée à des mesures de composition chimique (classiques ou infrarouge)

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Traduit l'action des microorganismes et des organismes du sol (de différentes tailles selon la taille des mailles du filet) sur le substrat présent dans le sachet. Rend compte de l'effet des populations sur un substrat *in situ*, ne comptabilise pas les populations elles-mêmes.

Comment s'effectue la mesure :

Dépôt (soit en surface mais plus souvent enfoui à 5 cm dans le sol) et retour par exemple après 4 mois. Pour les tea bag, le retour s'effectue après quelques semaines.

Le substrat est une matière organique fraîche soit issue du site (litières en forêt par exemple) soit standard (paille, thé d'une marque bien connue et répandue internationalement pour le tea bag).

Mesure de la masse « avant/après » éventuellement associée à des mesures de composition chimique (analyses Van Soest).

L'initiative de recherche participative et collaborative des tea bag reprend le principe des Litter bag avec un protocole formalisé et adapté à un large public (Keuskamp *et al.*, 2013)²⁶. L'initiative des Tea bag est portée par l'Union Européenne (European Network on Soil

26 - <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/networkcooperations/tea-bag-index>

Awareness). Deux types de thés sont utilisés pour quantifier à la fois la masse de matières organiques labiles dégradée et la masse stabilisée.

L'utilisation de litter-bag avec une taille de maille et une paille normée a été utilisée dans le cadre du CASDAR AgrInnov.

Différents travaux de recherche utilisent les litter-bag depuis de nombreuses années, avec une utilisation essentiellement en écologie des milieux naturels. L'utilisation s'étend maintenant aux milieux agricoles.

Stade de développement et le niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Méthode simple et très répandue. Des sachets sont disponibles à la vente. Il est également possible d'auto-fabriquer les sachets (matières organiques *in situ*).

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

Avantages / limites :

Avantage du faible coût. L'utilisation de filets imputrescibles permet de récupérer très facilement la litière (ou toute autre matière organique à tester) introduite dans le sol pour effectuer une pesée après le séjour dans le milieu.

La matière organique apportée est seule prise en compte (ne tient pas compte de la matière organique du sol). Selon la taille de la grille, on observe l'effet de la micro et/ou méso et/ou macrofaune.

La méthode est relativement simple et rapide à mettre en œuvre. Le test peut également être mis en place à des fins pédagogiques

3. SUIVI DE L'EFFET DES PRATIQUES SUR L'ÉTAT ORGANIQUE ET BIOLOGIQUE DU SOL

De manière générale, l'évolution des sols peut être observée par le suivi temporel des indicateurs mentionnés aux chapitres 1 et 2. Ce suivi temporel nécessite des protocoles expérimentaux spécifiques et rigoureux pour pouvoir interpréter les résultats. Selon les indicateurs mobilisés, les évolutions peuvent être constatées plus ou moins rapidement et traduire des changements spécifiques. Seules les pratiques très défavorables et souvent difficilement réversibles peuvent amener à constater des évolutions sur quelques mois. Plus communément, les indicateurs analytiques les plus sensibles peuvent amener à constater des changements au bout de 4-5 ans de modification des pratiques. Les moins sensibles permettent d'observer des changements produisant leurs effets sur plusieurs dizaines d'années.

Le suivi au cours du temps de résultats analytiques pose le problème des sources de biais et de dérive de la qualité d'analyse au cours du temps, même en utilisant une méthode normée. Lorsqu'on analyse des données d'essais à long terme, les meilleurs résultats sont obtenus en refaisant toutes les analyses en une seule fois (ex Dimassi et al., 2013, 2014 ; Autret et al, 2016).

Les indicateurs biologiques peuvent manifester des changements en quelques mois, essentiellement dans les cas de pratiques très défavorables.

Les indicateurs de l'état des sols les plus sensibles aux évolutions des pratiques ou du contexte climatique semblent être les suivants à la date de production de ce document : fractions organiques, activité enzymatique, lombriciens et nématodes (des effets négatifs se manifestent à l'échelle de quelques mois, les effets positifs demandent plus d'un an), indicateurs microbiologiques, indicateurs visuels. Les indicateurs microbiens réagissent plus vite aux changements de pratiques que les paramètres rendant compte du carbone des sols. Ils peuvent donc tous être considérés comme des indicateurs précoces.

Les indicateurs d'état étant déjà décrits en parties 1 et 2, leur description n'est pas reprise en partie 3.1.. Les indicateurs mobilisant des outils de modélisation sont décrits séparément au 3.2.

3.1. Suivis possibles à partir d'indicateurs d'état

3.1.1. Indicateurs relatifs aux fractions de la matière organique (voir partie 1)

Ces indicateurs sont notamment utilisables à l'échelle de la parcelle. Ils permettent la comparaison d'états entre des parcelles objet de pratiques différentes – analyse synchronique - ou l'appréciation d'évolutions sur les mêmes parcelles à intervalles de temps de plusieurs années – analyse diachronique -.

Un laboratoire utilise ces résultats pour formuler des conseils à partir de son propre référentiel. Dans le conseil aux groupes d'agriculteurs ces résultats sont utilisés en tant que support de formation.

La recherche utilise ces indicateurs dans le réseau de mesure pour la qualité des sols

Observation de changements rapides

Dans un premier temps, les fractions évoluent rapidement après un changement de pratiques, ce qui peut permettre de montrer l'intérêt d'un tel changement. Toutefois les cinétiques des processus sur le moyen ou long terme sont moins connues.

Le carbone facilement oxydable peut être assimilé aux fractions labiles du carbone. Dans ce sens, la méthode au permanganate pourrait donner une valeur approchée de ces fractions. Elle est utilisée à l'étranger mais n'est pas développée en France car considérée comme peu performante par la littérature scientifique. Cette méthode sera toutefois testée dans le cadre du projet Microbioterre (financement CASDAR 2016 – Arvalis ; cf partie 5).

Fractions stables

Le pool de matière organique stable indique indirectement la vulnérabilité du taux de matière organique présente dans le sol par rapport à un changement des pratiques.

Le modèle AMG estime actuellement le pool « carbone/matière organique stable » arbitrairement à 1/3 pour tous les types de sols et de pratiques : un référentiel sur cette variable permettrait l'amélioration du modèle AMG.

L'analyse est relativement peu coûteuse²⁷ et le matériel existe dans certains laboratoires de recherche. D'autres méthodes permettent de séparer les différents pools de matière organique, comme la méthode par pyrolyse Rock Eval (en cours d'évaluation pour les sols), ou la méthode thermique (en cours d'évaluation). La normalisation d'une méthode est envisageable d'ici 3 ans.

NB : S'agissant non pas des matières organiques du sol mais des matières organiques susceptibles d'être épandues, l'indicateur ISMO (Indice de stabilité des matières organiques, différent de l'indice de stabilité du carbone) permet de qualifier les matières organiques exogènes disponibles sur le marché (composts, digestats...). Cet indicateur est normé et des analyses sont conduites en routine sur les matières organiques exogènes. Ces mêmes analyses pourraient éventuellement être appliquées aux matières organiques des résidus de cultures.

3.1.2. Indicateurs microbiologiques (voir partie 2)

L'intérêt majeur de ces indicateurs est leur réactivité très précoce qui permet la comparaison de valeurs mesurées à des périodicités rapprochées. Des essais en cours montrent que le niveau de carbone peut rester sans changement alors que les communautés microbiennes, de nématodes et de lombriciens évoluent sur une période de 3 ans après un changement de pratiques.

Ces indicateurs sont utilisables à l'échelle de la parcelle. La définition de valeurs de référence par indicateur reste encore à développer. En effet, les indicateurs ne sont utilisables pour le conseil que s'ils sont associés à un référentiel. Des références existent déjà pour les indicateurs microbiens relevant de la biologie moléculaire (Biomasse moléculaire microbienne, diversité taxonomique bactérienne et de champignons) car ils ont été appliqués sur les sols du RMQS (2200 sols à l'échelle de la France).

Sur le terrain, une demande importante de références est exprimée. Les laboratoires disposent de certaines références mais elles ne sont pas exhaustives pour l'ensemble des contextes pédoclimatiques et des systèmes d'exploitation. Un des objectifs du projet Microbioterre (cf partie 5) est de fournir un référentiel pour certains indicateurs de microbiologie des sols, à utiliser en complément des menus des analyses de terre effectuées en routine, pour améliorer la gestion des restitutions organiques dans les systèmes de grandes cultures et de polyculture élevage. Par ailleurs, un projet porté par l'IDEL (Institut de l'Élevage) et financé par le CNIEL (cf partie 5) vise à disposer

27 - Prix de revient laboratoire 12 €

de variables microbiologiques sensibles aux pratiques agricoles et permettant donc d'évaluer la fertilité des sols.

3.1.3. Indicateurs d'activité enzymatique (voir partie 2)

Ces indicateurs sont très réactifs mais encore difficiles d'interprétation faute de références.

3.1.4. Indicateurs liés à la composition en lombriciens (voir partie 2)

L'augmentation ou la diminution du nombre d'espèces et/ou des abondances totales, par groupe fonctionnel ou par espèce peuvent être reliées à des conséquences fonctionnelles. Par exemple, des apports de matière organique grossière favorisent les espèces épigées alors que des apports de matière organique très humifiée (composts) favorisent les espèces endogées.

Les variations liées aux espèces endogées et de grande taille (les anéciques) vont impacter (1) le transfert du carbone des litières et le transfert de l'eau dans les horizons sous-jacents, (2) la stimulation des activités microbiennes et (3) l'augmentation de la structure grumeleuse, favorable à la rétention des nutriments et de l'eau dans ces sols.

L'évolution de la structure de ces communautés (proportion de chaque groupe fonctionnel ou de chaque espèce) donnera des indices sur la complémentarité d'impact entre ces acteurs biologiques.

3.1.5. Indicateurs liés à la composition en nématodes

L'augmentation ou la diminution des nématodes de différents groupes fonctionnels (groupes trophiques) et/ou des abondances totales donne des informations sur les activités microbiennes notamment.

Des indices nématofauniques peuvent être calculés à partir des abondances de ces différents groupes trophiques: indice de structure, indice d'enrichissement, indice de maturité, indice des voies de décomposition de la matière organique (nematode channel ratio).

Les indices d'enrichissement et indices de structure permettent d'établir un diagnostic du micro-réseau trophique du sol (Ferris et al., 2001) en lien avec la disponibilité en nutriments (notamment N). (Voir partie 2.2.2)

3.2. Outils d'aide à la décision mobilisant le modèle AMG à l'échelle parcellaire (outils Agrotransfert et Arvalis)

Deux Outils d'Aide à la Décision (OAD - Simeos-AMG et AMG) ont été développés à partir du même modèle AMG²⁸ (cf partie 5). La concordance des résultats issus des différents outils est assurée par un groupe d'expert réunis lors d'un projet CASDAR.

Ce qui est estimé :

L'outil permet d'estimer l'évolution des teneurs en matière organique du sol sur 30 ans par rapport aux pratiques agricoles à l'échelle d'une exploitation.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

L'outil peut être utilisé par les agriculteurs, les conseillers agricoles, les laboratoires effectuant les analyses pour orienter des choix de pratiques.

Comment s'effectue l'estimation :

Le modèle calcule l'évolution des teneurs de carbone, en fonction de l'état initial du sol – résultat d'analyse -, des pratiques, du type de sol - la teneur en argile vraie et la teneur en carbonates sont des paramètres analytiques importants -.

Stade de développement et niveau d'appropriation de la méthode et de ses résultats :

Le modèle est déjà opérationnel pour les grandes cultures, calé à partir d'essais longue durée en grandes cultures sur la France Métropolitaine. Il intègre déjà les intercultures mais pas encore les couverts associés. L'outil est en cours de développement sur les prairies à partir des expérimentations en place sur le site de Lusignan). L'outil n'est pas paramétré pour les cultures pérennes (viticulture, l'arboriculture, l'agroforesterie et la sylviculture). Des améliorations sont possibles pour la prise en compte de la qualité des matières organiques exogènes épandues sur les terres, matière par matière.

L'outil est disponible en ligne gratuitement sous forme de démonstrateur, les abonnés peuvent utiliser des fonctions avancées. De nombreux utilisateurs ont recours à la version libre d'accès de Simeos-AMG pour des simulations

répondant à des besoins ponctuels. L'outil est par exemple de plus en plus souvent mobilisé par les enseignants dans le cadre de formations agricoles

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

Cet outil est utilisable à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation. Le modèle actuel et basé sur l'hypothèse d'une masse volumique apparente fixe : les effets estimés par ce modèle pourraient donc s'avérer plus importants en intégrant la variation de la masse volumique apparente au fil du temps (celle-ci peut varier selon les pratiques de gestion du sol – travail, techniques culturales simplifiées, apports de matières organiques, etc. -).

NB : si un suivi de terrain s'appuie sur une détermination à profondeur constante au cours de mesures successives, il négligera la prise en compte explicite de la variation de densité apparente du sol (cas du passage au non labour par exemple). Les résultats concernant la variation de stock peuvent alors être biaisés.

Avantages / limites :

Son utilisation n'est pas encore généralisée au niveau du conseil agricole. L'appropriation de l'outil et des références reste à développer.

L'estimation des restitutions est nécessaire au paramétrage du modèle.

Pour l'instant les conseils sont basés sur des pratiques à l'identique - assolement rotations, exportations, apports de matières organiques - mais la simulation de changements de ces pratiques est possible. L'outil peut donc être mobilisé pour guider des choix techniques concernant les assolements, rotations, modalités d'exportations et/ou apports de matière organique afin de maintenir le stock de matière organique du sol ou de l'augmenter pour atteindre un niveau plus élevé de carbone du sol.

4. INDICATEURS DE POTENTIALITÉS D'ÉVOLUTION DES SOLS

Les sols agricoles présentent à un instant donné des niveaux très divers de teneur en matière organique. Cette variabilité spatiale provient à la fois de la diversité des contextes pédo-climatique, des historiques d'occupations, usages, et des pratiques culturales actuelles.

Par exemple, les prairies présentent en général des stocks de carbone beaucoup plus élevés que les terres en production de grandes cultures²⁹. De ce fait, des terres portant la même culture peuvent présenter des niveaux de carbone très différents et des cinétiques d'évolution du stock de carbone très contrastées selon leur historique de gestion. Une parcelle de céréales précédemment en prairie permanente présentera ainsi un niveau élevé de matière organique – de l'ordre de 3 % - alors que dans le même contexte pédo-climatique, une parcelle labourée depuis des décennies pourra présenter un niveau beaucoup plus faible - de l'ordre de 1 % voire moins.

Les teneurs actuelles en matière organique sont à leur tour également susceptibles d'évoluer en fonction de la nature et de l'état initial du sol ainsi que sous l'effet des pratiques agricoles ou de changements climatiques.

Ainsi, même en mettant en œuvre de bonnes pratiques après la mise en culture annuelle d'un terrain initialement en prairie, le niveau initialement élevé de matière organique **décroîtra rapidement** et ce malgré la mise en œuvre de bonnes pratiques. Les mêmes pratiques, appliquées à la même culture de céréales, cette fois installée sur la parcelle labourée depuis des décennies pourront au contraire contribuer à **augmenter le niveau de matière organique du sol** (parce que le niveau initial était bas).

Dans le cas du carbone, les stocks étant constitués de formes différentes de matières organiques, dont les temps de résidence peuvent être plus ou moins longs : à stock identique, **celui qui présente la plus forte proportion de carbone à temps de résidence long sera moins susceptible d'évolutions rapides de ce stock** sous l'effet des pratiques.

Le potentiel de stockage et le temps de résidence dépendent des caractéristiques de l'agro-écosystème (type de sol, caractéristiques de la phase minérale, température, pluviométrie, etc.), des types de matières organiques apportées et des pratiques de gestion du sol.

Ainsi, lorsqu'on poursuit un objectif d'évolution de l'état organique du sol - vers un stockage plus important de matière organique par exemple – il est indispensable de **tenir compte de l'écart entre l'état observé à l'issue du changement de pratiques et un état constituant un objectif pour un type de sol, une région, un historique et un système de culture considérés comme référence**.

Les indicateurs et outils permettant d'estimer si le niveau de matière organique du sol augmente, diminue ou est stable ont quant à eux déjà été traités dans le chapitre précédent.

29 - Source doc Ademe carbone des sols agricoles

Ce qui est mesuré lorsqu'il s'agit d'une méthode de mesure, ou ce qui est estimé,

Le potentiel de stockage de carbone d'un sol peut être défini comme l'accroissement maximal de C atteignable, pendant une durée donnée, sous un usage et mode de gestion donné. Il dépend du climat et du type de sol. Le potentiel de perte de stocks de carbone d'un sol peut être défini de manière symétrique.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Actuellement, il s'agit d'outils de recherche ou utilisés par les Etats pour leur rapportage d'émissions de gaz à effet de serre à l'UNFCCC dans le cadre du protocole de Kyoto. Ils sont également pertinents pour des diagnostics dans le cadre des politiques publiques (plans climat air énergie territoriaux).

Comment s'effectue la mesure ou l'estimation :

Différentes approches sont aujourd'hui possibles, de complexité croissante :

- L'approche « Tier1 » du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)

Il s'agit de la méthodologie par défaut du GIEC. Le guide méthodologique du GIEC propose en effet pour la méthode la plus simple, des valeurs par défaut des stocks de carbone des sols, selon le climat, et le type de sol et des « coefficients d'émission » relatifs à l'usage, aux pratiques agricoles (par exemple labour) et aux restitutions (résidus de culture).

Dans cette approche les stocks de C organique sont estimés comme

$$SOC = SOC_{ref} \times F_{LU} \times F_{MG} \times F_I ;$$

avec :

- SOC = stock de carbone organique du sol en t/ha pour 0-30 cm de profondeur ;
- SOC_{ref} donné dans des tables de référence, par zone climatique et type de sol ;
- F_{LU} = facteur d'émission relatif à l'usage du sol (par ex = 0,69 pour un sol cultivé depuis des décennies) ;

- F_{MG} = facteur d'émission relatif à la gestion (par ex = 1,3 en non labour) ;
- F_I = facteur d'émission relatif aux entrées organiques au sol (par ex = 1 si les résidus de culture sont restitués).

La variation des stocks pendant un intervalle de temps donné est évaluée par différence avec la valeur initiale, en considérant que la variation est linéaire en fonction du temps (20 ans).

- L'approche « Tier 2 » du GIEC

La méthode est la même que précédemment mais les valeurs de stocks comme les facteurs d'émission sont modulées en fonction de données régionales. Ces valeurs peuvent être obtenues en se basant sur des essais de longue durée ou sur des bases de données sol.

- L'approche « Tier 3 » du GIEC

Des modèles de dynamique des matières organiques sont utilisés pour prédire l'évolution des stocks de C des sols suite à un changement de gestion et/ou de climat.

Différents modèles sont utilisés à l'échelle internationale pour estimer ces évolutions et donc un potentiel de stockage. En France le modèle AMG peut être utilisé avec cette finalité pour ce qui est des sols agricoles.

Aux méthodes, évoquées ici parce qu'elles sont utilisables en dehors de la procédure de rapportage des émissions de gaz à effet de serre nationales, peuvent être ajoutées différentes approches :

- La mesure directe

Elle est faite en utilisant des essais de longue durée ou des parcelles d'historique connu. Ainsi la seconde campagne du RMQS, qui vient de démarrer, devrait permettre, à 10 ans d'intervalle, de détecter des évolutions de la teneur en carbone de quelques pour mille par an et pourrait permettre de détecter l'effet de changement de pratiques.

- L'approche « saturation »

Il s'agit de quantifier la taille d'un compartiment « stable » des matières organiques des sols à partir de leur granulométrie. Des travaux de

recherche suggèrent en effet que l'abondance des argiles et limons fins d'un sol fixent la limite maximale de la quantité de matières organiques qu'ils peuvent protéger de la biodégradation (Hassink *et al.* 1997). Cependant, c'est un compartiment stable des matières organiques qui est ainsi estimé, et non un stock total de carbone. Les premières tentatives pour estimer un « déficit de saturation » des sols agricoles français en carbone font donc de fortes hypothèses qui restent à conforter (Angers *et al.* 2011).

Dans le même ordre d'idée, Dexter *et al.* (2008) définissent en contexte français (RMQS) un compartiment qu'ils appellent « carbone organique complexé » et qui est égal au minimum entre la teneur en argile divisée par 10 et la teneur totale en carbone organique. Ce compartiment serait plus stable et plus actif sur les propriétés physiques du sol que le carbone organique total. Il est probable que ces relations ne sont pas généralisables à des sols de minéralogie des argiles plus contrastée.

5. TRAVAUX EN COURS ET PROJETS À VENIR

Cette partie présente les travaux conduits en lien avec le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, il existe d'autres travaux qui seront compilés dans le cadre du Réseau National d'Expertise Scientifique et Technique sur les sols (RNEST), lancé fin 2016 par le MAA, le MTES et le MESR

5.1. Observatoires de longue durée

5.1.1. L'observatoire Agricole de la Biodiversité (OAB)³⁰

L'OAB implique des agriculteurs dans l'observation et la création de références sur la biodiversité en milieu agricole. Cet observatoire vise à répondre au besoin d'indicateurs de suivi de l'état de la biodiversité en milieu agricole, afin de qualifier le lien entre pratiques agricoles et biodiversité. Il propose des protocoles d'observation de la biodiversité ordinaire aux agriculteurs intéressés, dont des observations en lien avec la fertilité des sols (« protocole vers de terre »).

L'observatoire a pour vocation de :

- renseigner une base de données scientifique permettant notamment de tracer les tendances globales à long terme, d'évolution de la biodiversité ordinaire en milieu agricole ;
- sensibiliser et accompagner les acteurs impliqués.

Les résultats et les enseignements issus de la mise en commun de ces observations permettront d'établir des références et des tendances à une échelle globale.

L'OAB est piloté par le ministère en charge de l'agriculture, dans le cadre de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité. Ce projet national a démarré en 2009. Sa coordination scientifique est assurée par le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), en partenariat avec l'Université de Rennes 1. L'Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture intervient en appui pour l'animation nationale.

5.1.2. Réseau de surveillance biologique du territoire pour évaluer les effets non intentionnels des pratiques agricoles (Biovigilance SBT-ENI)

Lancé en mars 2012, cette action s'inscrit dans le cadre de l'axe 5 du plan Ecophyto relatif à la surveillance biologique du territoire dans le domaine végétal.

La première campagne a permis de sélectionner les parcelles de référence, de mobiliser des observateurs et animateurs régionaux, ainsi que d'asseoir la mise en œuvre des protocoles contenus dans un vade-mecum national. Des formations sont dispensées pour chaque groupe d'espèces indicatrices de biodiversité en milieux agricoles. La deuxième campagne a généré des données d'observations de biodiversité complétées d'informations paysagères et culturelles très précises, en agriculture conventionnelle comme en agriculture biologique. Les compétences partagées entre agronomes et écologues sont l'un des points forts du réseau.

30 - <http://observatoire-agricole-biodiversite.fr/presentation>

500 parcelles de France métropolitaine sont suivies pendant 10 ans. Des relevés de lombriciens y sont notamment effectués. Les partenaires scientifiques de l'action sont le MNHN, l'Université de Rennes 1, l'ANSES-LSV, référents auprès du CSBT.

5.2. Projets aboutis ou en cours d'aboutissement (soutenus par le MAA) :

5.2.1. CASDAR AgrInnov (Indicateurs de l'état biologique des sols agricoles & démarche participative) (CASDAR IP 2011-2014)

Les objectifs du projet AgrInnov étaient de tester les indicateurs de mesure de l'impact des pratiques sur la qualité biologique des sols agricoles.

Le résultat est un tableau de bord dans lequel est caractérisé l'impact des pratiques sur la qualité biologique des sols, et des formations pour les agriculteurs et les techniciens de chambre, pour acquérir des bases de biologie des sols, se familiariser avec le maniement de ces outils et en comprendre les résultats.

En fonction de ces informations sur la manière dont les sols réagissent à la manière de les utiliser, en fonction de seuils d'alertes et d'optimum donnés par indicateur, les agriculteurs peuvent faire évoluer leurs pratiques agricoles. Une boîte à outils mobilisant à la fois lombriciens, microorganismes, nématodes, litter bag et tests bêche permet en outre d'estimer la biodégradation de litière et la structuration du sol.

Dans le cadre de la fin du programme ADEME "Bioindicateurs de qualité des sols" et en lien avec le programme AgrInnov, des informations (ex : fiches techniques, protocoles d'échantillonnage, vidéos, aide au choix des indicateurs) sur les indicateurs biologiques ont été produites et mises en ligne³¹. Ce site est actualisé régulièrement. Le CASDAR AgrInnov a en outre donné naissance au REVA (réseau d'expérimentation et de veille à l'innovation agricole), qui a pour objectif de déployer à plus grande échelle les formations et le tableau de bord mis en place dans AgrInnov, tout en continuant une veille technologique et scientifique sur la possibilité d'intégrer des nouveaux indicateurs en fonction des avancées de la recherche.

5.2.2. CASDAR Sys-Vit Sol-Vin (CASDAR IP 2011-2014)

L'objectif du projet était d'acquérir des données et des indicateurs sur la qualité biologique des sols en lien avec la minéralisation de l'azote du sol, la gestion de la nutrition azotée de la vigne et la qualité organoleptique des baies et du vin.

5.2.3. CASDAR AMG (CASDAR RFI 2009-2011)

Objet du projet : développement d'un outil d'aide à la décision pour gérer le stock de carbone organique des sols cultivés. Adaptation et mise en œuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage.

5.2.4. CASDAR Réseau PRO (CASDAR IP 2011-2014)

31 - <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/>

Le projet visait à évaluer les pratiques de gestion de la matière organique, telles que l'exportation des pailles et la production de biomasse, par rapport à la compatibilité avec le maintien du statut organique des sols et à l'apport des PRO. Les résultats du projet ont permis d'élargir le domaine de validité du modèle (conditions du sud de la France en déficit hydrique, type de sol variés, apport de matières fertilisantes organiques variés – PRO, CIPAN, prairies, cultures à production de biomasse), ainsi que d'améliorer son paramétrage (Bouthier *et al.*, 2014).

5.2.5. CASDAR INDIBIO (CASDAR RF 2011-2013, financements supplémentaires du CNIEL et d'INTERBEV³²)

Identification et validation d'INDicateurs pertinents relatifs aux pratiques agronomiques et aux infrastructures permettant d'évaluer la BIODiversité dans les systèmes d'exploitation d'élevage et de polyculture-élevage.

Le projet a fourni un prototype d'évaluation multicritère pour prédire une valeur écologique, de la parcelle au territoire (BIOTEX). La prédiction de la valeur écologique de la prairie permanente et des composantes paysagères est réalisée à partir de l'identification des pratiques agricoles, de la densité des infrastructures agro-écologiques et du contexte paysager. Cette valeur écologique est établie pour la flore et cinq espèces faunistiques illustrant des services écologiques. Enfin, ce prototype a été testé dans une cinquantaine de fermes d'élevage. Le critère utilisé comme indicateur de la biodiversité dans les sols est le critère « les vers de terre » (Manneville *et al.*, 2016).

5.3. Travaux en cours

5.3.1. CASDAR QUASAGRO (CASDAR IP 2015-2018)

Question posée : « gestion agronomique des sols et des résidus : quels impacts sur la qualité sanitaire des productions végétales de grande culture ? »

En relation avec la qualité sanitaire des produits de la récolte, le projet vise à valider des éléments de gestion globale des risques multi-contaminants (mycotoxines, éléments-traces métalliques et résidus de pesticides) associés aux facteurs environnementaux et aux pratiques agronomiques en grandes cultures par analyse multifactorielle : effets pédoclimatiques, résidus de culture, intrants et apports de matière organique. Il s'appuie sur le réseau national de parcelles Quasaprove, renforcé par des essais plein champ existants (SOERE PRO de Rennes, Essai "Travail du sol" de Boigneville, réseaux RotAB et Rés0Pest).

Le suivi d'activités microbiennes des sols (cellulases, glucosidases, uréases, phosphatases, aminopeptidases, laccases) impliquées dans la dégradation et la minéralisation des matières organiques du sol (résidus de récoltes ou matières organiques exogènes) permettra de rendre compte de l'intensité de recyclage de ces matières organiques. Les activités microbiennes seront confrontées i) aux niveaux de contamination en ETM, résidus de pesticides des sols et à la contamination en mycotoxines des cultures et ii) au potentiel infectieux pour lequel les résidus de récolte constituent un réservoir potentiellement important.

5.3.2. CASDAR VITIFOREST (CASDAR IP 2015-2018)

Objet du projet : mise en place et évaluation de sites pilotes en agroforesterie viticole.

L'objectif du projet est d'acquérir des références sur les services (agronomiques, environnementaux et économiques) que pourrait apporter l'implantation d'arbres à l'intérieur d'une parcelle viticole.

Concernant les sols, le projet vise à améliorer les connaissances et les références sur la relation entre biodiversité dans le sol et les pratiques agricoles, en posant trois hypothèses : l'arbre modifie la quantité et la diversité des ressources disponibles pour la faune ; le couvert forestier a un effet propre sur le microclimat du sol ; l'introduction d'arbres complexifie l'organisation spatiale de la parcelle : coexistence de plusieurs zones agro-pédologiques homogènes. Le projet vise donc à mesurer l'abondance, la diversité et la distribution spatiale des organismes du sol. Les indicateurs choisis concernent à la fois les micro-organismes, la macrofaune, mais également les arthropodes, la température du sol et les analyses physico-chimiques.

5.3.3. CASDAR Microbioterre (CASDAR RT - 2017-2021)

Objet du projet : référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des restitutions organiques dans les systèmes de grandes cultures et polyculture élevage

L'analyse de terre fournit aujourd'hui aux agriculteurs des informations pour gérer la fertilisation minérale et les apports d'amendements minéraux basiques. Par contre, ces analyses fournissent peu d'informations pour piloter d'autres pratiques de gestion du sol, notamment celles impactant l'activité biologique (apport d'amendements et fertilisants organiques, couvert végétal, restitution des résidus de culture). Les livrables du projet permettront d'élargir le diagnostic et le conseil pour la gestion des sols, optimisant la fertilisation et plus en général la qualité biologique, physique et chimique des sols.

5.3.4. CASDAR MYCOAGRA (CASDAR IP 2017-2021)

Objet du projet : Étude de la mycorhization naturelle sur le maïs et le noyer selon différentes modalités de culture en privilégiant les pratiques de conservation des sols.

Le projet a pour ambition de contribuer à la compétitivité des systèmes de cultures favorables à la vie des sols, au stockage du carbone, à la préservation des ressources en eau et à la diminution d'utilisation d'intrants chimiques en agissant pour la prise en compte des symbioses endomycorhiziennes dans les pratiques agricoles. Par une étude des services écosystémiques rendus par la mycorhization naturelle à deux cultures représentatives que sont le maïs et le noyer, le réseau MYCOAGRA veut promouvoir une recherche-action dynamique centrée sur cette dimension importante du bon fonctionnement des sols apte à contribuer à la triple performance.

Grâce à un partenariat associant recherche, enseignement et développement agricole et à partir de l'étude du statut mycorhizien de parcelles en systèmes assolés et en agroforesterie, ce projet s'attachera à produire des connaissances scientifiques et des outils de transferts qui seront déployés pour enrichir, sensibiliser et accompagner les actions en faveur de l'agro-écologie à partir de l'entrée mycorhize vers l'ensemble des agriculteurs français.

5.4. Travaux en projet

En lien avec l'ADEME et le MAAF, l'INRA prévoit d'initier en 2017 une étude sur le potentiel français en matière de 4 pour mille.

6. COMMENTAIRES COMPLÉMENTAIRES

Sur les analyses

Ordre de grandeur des coûts de menus analytiques classiques : 60 € pour chimie, 80 € avec des paramètres physiques (granulométrie) ; + 20 € pour oligoéléments.

Les analyses physiques ne sont pas faites systématiquement mais informent beaucoup pour l'interprétation et n'ont pas besoin d'être renouvelées fréquemment.

N.B. : pour exemple, au Luxembourg, les agriculteurs doivent procéder à des analyses de sols pour être éligibles aux MAE (le ministère est le seul laboratoire qui effectue toutes les analyses).

Sur l'appropriation par les agriculteurs

Les agriculteurs identifient des propriétés et caractéristiques des sols plus que des caractéristiques analytiques.

Il serait intéressant de développer des indicateurs intégrateurs, permettant d'améliorer la capacité des agriculteurs à évaluer, par eux-mêmes ou en groupe, à l'aide d'outils simples et faciles à utiliser tels que les observations des états de surface, de la compacité, de la compaction et de la battance avant de passer aux analyses chimiques puis biologiques.

Le développement de l'offre de formation et l'organisation des réseaux sont essentiels pour que les observations effectuées aient du sens et puissent être agrégées et valorisées au niveau des collectifs.

Le test bêche est considéré comme le plus pédagogique et le mieux accepté. Il permet d'aborder la structure et la vie du sol, mais il reste moins informatif que les autres indicateurs. Il doit être considéré comme une entrée en matière pour l'agriculteur.

Ces observations sont considérées comme nécessaires avant tout changement de pratiques afin de pouvoir suivre les évolutions après au moins un délai de 3 ans (préférable 5) pour les indicateurs les plus réactifs. Les fermes DEPHY en Bretagne ont entrepris l'établissement de ce point zéro.

Des références utiles et spécifiques à l'exploitation peuvent être établies en effectuant des tests et mesures sur les prairies et sur les bandes enherbées.

Sur les intrants organiques

Des mesures réalisées sur les matières organiques exogènes à apporter au sol permettent de prédire la proportion de matière organique potentiellement stable estimant le K1 du modèle AMG d'évolution des stocks de matière organique.

Ces mesures combinent un fractionnement biochimique de la matière organique ainsi que l'étude de la minéralisation de son carbone organique à court terme, suite à apport sur un sol en conditions contrôlées de laboratoire. Il est ensuite possible de calculer l'ISMO (FD U 44-162).

Ces méthodes ont été validées sur amendements organiques (NF U 44-051 et NF U 44-095) (Lashermes *et al.* 2005, 2009 a et 2009 b).

Il serait intéressant d'étendre ces méthodes à d'autres matières organiques exogènes (résidus de culture, engrais organiques et organo-minéraux, matière organique hyperstabilisée...).

Ces mesures pourraient être menées en complément des mesures sur sol qui prennent en compte d'autres pratiques complémentaires (travail du sol, rotation, choix culturaux...).

7. CONCLUSION

* La mesure de l'état et des évolutions d'état des sols prend son sens par rapport à des niveaux de référence, utilisables comme objectifs et par rapport à l'identification de cinétiques de fond indépendantes des pratiques mises en œuvre. Il est donc très important de pouvoir disposer de références permettant à l'agriculteur de confirmer que ses pratiques sont favorables et, si elles ne le sont pas, d'identifier quels itinéraires de substitution pourraient permettre de meilleurs résultats concernant les sols. Dans cette perspective, les outils de modélisation semblent particulièrement prometteurs.

Pour les réseaux de suivi institutionnel des évolutions des sols, des protocoles spécifiques sur des réseaux dédiés doivent être maintenus pour garantir la précision et la validité des résultats.

* Une difficulté identifiée concerne le décalage entre les temporalités socio-économiques et le temps nécessaire pour passer d'un état du sol dégradé à un état « agraté³³ ». Le temps d'investissement d'agradation peut être long en comparaison du temps d'obtention des résultats positifs pour la production et donc pour le revenu de l'exploitant.

* Vers un « menu » analytique de base ? Les mesures les plus immédiatement utilisables et interprétables pour l'exploitant et permettant d'offrir une vision large du statut organique et des communautés du sol pourraient être : teneurs en C et N du sol, matière organique particulaire, granulométrie (à réaliser une seule fois par parcelle), respiration du sol et biomasse microbienne, lombriciens et nématodes. A noter : pour être valorisées au-delà de la seule utilisation sur l'exploitation, les protocoles de prélèvement et d'analyse doivent être standardisés et rigoureusement maîtrisés.

Des menus plus spécifiques restent néanmoins plus pertinents s'il s'agit d'instruire des questions plus ciblées.

Pour mémoire, les extractions/quantifications d'ADN du sol vont très certainement se développer très rapidement et leur intégration à un menu pourrait être envisageable d'ici quelques années.

* Encourager la généralisation des observations qualitatives

Par ailleurs, il peut s'avérer plus pertinent, d'aller directement mesurer un indicateur de la fonctionnalité du sol recherché (stabilité structurale par exemple) plutôt que de multiplier les analyses sur le statut organique et biologique des sols.

Une sensibilisation des agriculteurs à l'importance de bien connaître leurs sols par quelques tests simples et non coûteux (test bêche, lombricien) est important parallèlement au développement du réseau d'observatoire participatif.

33 - Ce terme est de plus en plus utilisé pour qualifier le processus de reconstitution d'un état de meilleure qualité – par opposition au terme « dégradé » -

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Documents cités supra :

- Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P.A., Soussana, J.F., Stengel, P. (Eds.) (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? INRA Editions, Paris, 332 pp.
- Autret B., Mary B., Chenu C., Balabane M., Girardin C., Bertrand M., Grandeau G., Nicolas Beaudoin N. (2016), Alternative arable cropping systems: A key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment *Agriculture, Ecosystems and Environment* 232 (2016) 150–16
- Balesdent, J., Pétraud, J.P., Feller, C. (1991). Effet des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. *Science du Sol* 29, 95-106.
- Balesdent, J. (1996). The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 47, 485-494.
- Bispo, A., Grand, C., & Galsomies, L. (2008). Le programme ADEME "Bioindicateurs de qualité des sols" : Etude et Gestion Des Sols, 16, 145–158.
- Blandin, P. (1986). Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. *Bulletin D'écologie*, Tome 17, n°4. Travail Réalisé Dans Le Cadre Des Activités de l'association "Atelier Vert de La Forêt de Fontainebleau". Contrat Du Ministère de l'Environnement N° 82 160, 160.
- Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K.R., Dai J., Dendooven L., Peres G., Tondoh J.E., Cluzeau D. and Brun J.J. (2013). A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, 64-2, 161-182.
- Blouin M., Sery N., Cluzeau D., Brun J.J. & Bédécarrats A. (2013) Balkanized Research in Ecological Engineering Revealed by a Bibliometric Analysis of Earthworms and Ecosystem Services. *Environmental Management*, 52, 309–320
- Boizard H. ; Ball B.C. ; Shepherd G. ; Roger-Estrade J, (2013), 7. Caractérisation au champ de la structure des horizons de surface des sols cultivés, in *Les sols et leurs structures*, Editions Quae, 264 p., 2013, Synthèses
- Bouthier, A., Duparque, A., Mary, B., Sagot, S., Trochard, R., Levert, M., ... Ganteil, F. (2014). Adaptation et mise en œuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage. *Innovations Agronomiques*, 34, 125–139. Retrieved from <http://www6.inra.fr/ciag/content/download/5229/40877/file/Vol34-9-Bouthier.pdf>
- Bouthier A., Trochard R., Evaluation de l'incidence d'apports réguliers d'engrais de ferme sur des indicateurs de fertilité physique, chimique et microbiologique des sols, sous rotation maïs fourrage - blé et sous prairie temporaire (essais de longue durée), *Journées AFPF, La fertilité des sols dans les systèmes fourragers*, 8-9 Avril 2015, p 49-58
- Cambou, A., Cardinael, R., Kouakoua, E., Villeneuve, M., Durand, C., Barthès, B.G., 2016. Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field. *Geoderma* 261, 151-159.
- Chan, K.Y. (2001). Soil particulate organic carbon under different land use and management. *Soil Use and Management* 17(4), 217-221.
- 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. <http://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>.
- Dimassi, B., Cohan, J.-P., Labreuche, J., Mary, B., (2013) Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 169, 1 April 2013, Pages 12-20
- Dimassi, B., Mary, B., Wylleman, R., Labreuche, J., Couture, D., Piraux, F., Cohan, J.-P. (2014) Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Volume 188, 15 April 2014

- Disnar, J.R., Guillet, B., Keravis, D., Di-Giovanni, C. & Sebag, D. (2003). Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. *Organic Geochemistry*, 34, 327–343.
- Ellert, B.H., Bettany, J.R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75, 529–538.
- Gobrecht, A., Roger, J.-M., Bellon-Maurel, V. (2014). Major Issues of Diffuse Reflectance NIR Spectroscopy in the Specific Context of Soil Carbon Content Estimation: A Review. *Advances in Agronomy* 123, 145-175.
- Grinand, C., Barthes, B. G., Brunet, D., Kouakoua, E., Arrouays, D., Jolivet, C. & Bernoux, M. (2012). Prediction of soil organic and inorganic carbon contents at a national scale (France) using mid-infrared reflectance spectroscopy (MIRS). *European Journal of Soil Science*, 63(2), 141-151.
- Hassink J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles, *Plant and Soil*, Volume 191, n°1, pp 77-87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>
- Haynes, R.J. (2000). Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology & Biochemistry* 32, 211-219
- Haynes, R.J. (2005). Labile organic Matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. In: D.L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 221
- Horrigue W, S Dequiedt, N Chemidlin Prévost-Bouré3, C Jolivet, N PA Saby, D Arrouays, A Bispo, P-A Maron and L Ranjard (2016). Predictive Model of Soil Molecular Microbial Biomass. *Ecological Indicators*. 64:203-211
- Jolivet, C., Arrouays, D. (1997). Comparaison de quelques méthodes de caractérisation des teneurs en carbone et en matière organique des sols sableux podzolisés. *C.R. Acad. Sci. Paris 324 Série Ila*, 393-400.
- Jolivet C., Berché P., Boulonne L., Lehmann S., Maître B., Ratié C., Schellenberger E. & Soler-Dominguez N. (2016). Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine, 2016 – 2027, Version 1.1 juillet 2016, INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France
- 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*, December 2009, Volume 325, Issue 1–2, pp 171–185
- Keuskamp, J. A., Dingemans, B. J. J., Lehtinen, T., Sarneel, J. M., & Hefting, M. M. (2013). Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(11), 1070–1075. <http://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>
- Lashermes G., Houot S., Nicolardot B., Parnaudeau V., Morvan T., Lineres M., Mary B., Thuriès L., Metzger L., Villette C., Tricaud A., Guillotin M.L. (2005) Caractérisation des produits résiduaux organiques - Une base de données pour la définition de classes de produits opérationnelles Congrès du GEMAS-COMIFER 16 nov 2005.
- Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuriès L., Chaussod R., Guillotin M.L., Lineres M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C. & Houot S. (2009 a) Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science*, 60: 297-310.
- Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuriès L., Chaussod R., Guillotin M.L., Lineres M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C. & Houot S. (2009 b) Typology of exogenous organic matters based on chemical and biochemical composition to predict potential nitrogen mineralization. *Bioresource Technology*, vol 101, Issue 1: 157-164.
- Lemaître, A., Chaussod, R., Tavant, Y., & Bruckert, S. (1995). An attempt to determine a pool of labile organic matter associated with the soil microbial biomass. *European Journal of Soil Biology*, 31, 121–125.
- Lemaître, A., Tavant, Y., Chaussod, R., & Andreux, F. (1995). Characterization of microbial components and metabolites isolated from a humic calcic soil. *European Journal of Soil Biology*, 31, 127–133.
- Manneville, V., Michel, N., & Amiaud, B. (2016). INDIBIO : Élaborer des indicateurs relatifs aux effets des pratiques agricoles sur la biodiversité dans les systèmes d'exploitation d'élevage. *Innovations Agronomiques*, 49, 83–97. <https://doi.org/http://doi.org/10.15454/1.4622765655890154E12>
- Martin, M., Wattenbach, M., Smith, P., Meersmans, J., Jolivet, C., Boulonne, L., Arrouays, D. (2011). Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences* 8, 1053- 1065.

- Nelson, D.W., Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, M.E. Sumner (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America Madison, WI., pp. 961-1010.
- Pérès, G., Gautronneau, Y., Savini, I. (2005). Echanges scientifiques autour du modèle Hérody-BRDA de connaissance des sols, Actes du séminaire sur les recherches en agriculture biologique - Programme AgriBio de l'INRA 2. Paris (FRA) : Editions INRA, pp. 51 p.
- 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 and Biochemistry*, Volume 95, Pages 262-274
- Sebag, D., Disnar, J.R., Guillet, B., Di Giovanni, C., Verrecchia, E.P. & Durand, A. 2006. Monitoring organic matter dynamics in soil profiles by "Rock-Eval pyrolysis": bulk characterization and quantification of degradation. *European Journal of Soil Science*, 57, 344–355
- Skjemstad, J.O., Swift, R.S., McGowan, J.A. (2006). Comparison of the particulate organic carbon and permanganate oxidation methods for estimating labile soil organic carbon. *Australian Journal of Soil Research* 44, 255–263.
- Terrat S, Plassart P, Bourgeois E, Ferreira S, Dequiedt S, Adele-Dit-De-Renseville N, Lemanceau P, Bispo A, Chabbi A, Maron PA, Ranjard L. (2015). Meta-barcoded evaluation of the ISO Standard 11063 DNA extraction procedure to characterize soil bacterial and fungal community diversity and composition; *Microbial Biotech*, 8, 131-142.
- Tirol-Padre, A., Ladha, J. K. (2004) Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 969–978
- Valé, M., Bouthier, A., Trochard, R., Chaussod, R., & Nouaïm-Chaussod, R. (2011). Pertinence de nouveaux indicateurs pour évaluer l'impact des pratiques culturales sur le fonctionnement biologique des sols. In 10èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse du COMIFER et du GEMAS.
- Vaudour, E., Gilliot, J.M., Bel, L., Lefevre, J., Chehdi, K. (2016). Regional prediction of soil organic carbon content over temperate croplands using visible near-infrared airborne hyperspectral imagery and synchronous field spectra. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 49, 24-38.
- 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. <http://doi.org/10.1079/AJAA2003003>
- Bibliographie complémentaire :
- ADEME, 2014, Carbone organique des sols : l'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat 17p, <http://www.ademe.fr/carbone-organique-sols-lenergie-lagro-ecologie-solution-climat>
- Baize, D. (2006). Guide des analyses en pédologie (2e édition). Paris: INRA Edition.
- Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Dombos, M., Graefe, U., Krogh, P., ... Römbke, J. (2009). Indicators for Monitoring Soil Biodiversity. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5(4), 717-719. <http://doi.org/10.1897/IEAM-2009-064.1>
- Bruckert S., Andreux F., Correa A., Ambouta J.M.K., Souchier B. (1978) Fractionnement des agrégats appliqué à l'analyse des complexes organo-minéraux des sols. IIè Congrès Int. Assoc. Sc. du sol, Edmonton, Canada
- Calvet, R., Chenu, C., Houot, S. (2011). Les matières organiques des sols. Rôles agronomiques et environnementaux. Editions France Agricole.
- Chenu, C. (2003). Comment caractériser les matières organiques du sol ?, Fertilités du sol et systèmes de culture. Actes des journées du Comifer Gemas, Blois, p 107-117
- Chenu, C., Klumpp, K., Bispo, A., Angers, D., Colnenne, C., & Metay, A. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*, 37, 23–37.
- Clairotte, M., Grinand, C., Kouakoua, E., Thébault, A., Saby, N.P.A., Bernoux, M., Barthès, B.G. (2016). National calibration of soil organic carbon concentration using diffuse infrared reflectance spectroscopy. *Geoderma* 276, 41-52.

- Cluzeau, D., Guernion, M., Chaussod, R., Martin-Laurent, F., Villenave, C., Cortet, J., ... 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. <http://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.003>.
- Cluzeau D., G. Pérès, M. Guernion, R. Chaussod, J. Cortet, M. Fargette, F. Martin-Laurent, T. Mateille, C. Pernin, J-F. Ponge, N. Ruiz-Camacho, C. Villenave, L. Rougé, V. Mercier, A. Bellido, M. Cannavacciuolo, D. Piron, D. Arrouays, L. Boulonne, C. Jolivet, P. Lavelle, E. Velasquez, O. Plantard, C. Walter, B. Foucaud-Lemercier, S. Tico, J-L. Giteau, A. Bispo. (2009) - Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols : Exemple du programme-pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 16, 3/4, 187-201
- Cortet J., Gornot A., Poinot-Balaguer N., Gomot L., Texier C. & Cluzeau D. (1999) - The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects. *European Journal of Soil Biology* 35, 115-134.
- Denoroy P., Dinh J.-L., Blin B., Ganteil F. (2014), Adaptation et mise en oeuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage, *Innovations Agronomiques* 34 (2014), 125-139
- Devillers, P. Pandard, A.-M. Charissou (2009). Sélection multicritère de bioindicateurs de la qualité des sols, *Etude et Gestion des Sols*, 16, 3/4, p233-242
- Duparque, A., Tomis, V., Mary, B., Boizard, H., & Damay, N. (2011). Pour une démarche de conseil fondée sur des cas-types régionaux. In 10èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS.
- Jandl, R., Rodeghiero, M., Martinez, C., Cotrufo, M. F., Bampa, F., van Wesemael, B., Miglietta, F. (2014). Current status, uncertainty and future needs in soil organic carbon monitoring. *Science of the Total Environment*, 468-469, 376–383. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.026>
- Jegou D., Cluzeau D., Hallaire V., Balesdent J. & Trehen P., (2000). Burrowing activity of the earthworm *Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea giardi* and consequences on C transfers in soil. *Europ. J. Soil Biol.*, 36 : 27-34.
- MAAF Ecophyto (2014), Bulletin de liaison du réseau national de Biovigilance n°3 – Hiver 2013/2014, 11p
- Metzger L., Nassr-Amellal N (2003) Comment analyser les biomasse microbienne d'un sol ? 6è rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre
- Metzger L., Robin D. (2000) Soil organic matter status. Estimation using routine measurements of soil microbial biomass carbon. Colloque IHSS, Toulouse, juillet 2000
- Peigne J., M. Cannavaciolo, Y. Gautronneau, A. Aveline, J.L. Giteau, D. Cluzeau (2009). Earthworm populations under different tillage systems in organic farming. *Soil and Tillage Research*, 104, 207-214
- Pérès G., Bellido A., Marmonier P., Curmi P. & Cluzeau D. (2010). Relationship between earthworm communities and burrow numbers under different land use systems. *Pedobiologia*, 54, 37-44
- Pérès G., Cluzeau D., Menasserri S., Soussana J.F., Bessler H., Engels C., Habekost M., Gleixner G., Weigelt A., Weisser W. W., Scheu S. & Eisenhauer N. (2013) Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient. *Plant & Soil*, 373, 285-299
- Pérès G., Piron D., Bellido A., Goater C., Cluzeau D. (2008). Earthworms used as indicators of agricultural managements. *Fresenius Environmental Bulletin*. Volume 17 – No 7b.
- Pérès, G., Vandenbulcke, F., Guernion, M., Hedde, M., Beguiristain, T., Douay, F., ... Cluzeau, D. (2011). Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). *Pedobiologia*, 54(SUPPL.), S77–S87. <http://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.09.015>
- Pérès, G., Vandenbulcke, F. Guernion, M., Piron, D., Rougé, L., Hedde, M., Bispo, A., ... Cluzeau, D. (2010). The use of earthworms as tool for soil monitoring, characterization and risk assessment. Example of a Bioindicator Programme developed at National scale (France). In 9th International Symposium on Earthworm Ecology. Xalapa, MEX (2010-09-05 – 2010-09-10).
- Pelosi C., B. Pey, G. Caro, D. Cluzeau, J. Peigné, M. Bertrand, M. Hedde (2016) - Dynamics of earthworm taxonomic and functional diversity in ploughed and no tilled cropping systems. *Soil & Tillage Research*, Volume 156, March 2016, Pages 25-32

- Pelosi C., B. Pey, M. Hedde, G. Caro, Y. Capowiez, M. Guernion, J. Peigné, D. Piron, M. Bertrand, D. Cluzeau (2014). Reducing tillage in cultivated fields increases earthworm functional diversity. *Applied Soil Ecology*, 83, 79-87
- Piron D., G. Pérès, V. Hallaire, D. Cluzeau (2012). Morphological description of soil structure patterns produced by earthworm bioturbation at the profile scale. *European Journal of Soil Biology*, 50, Pages 83-90
- Ponge J.F., G. Pérès, M. Guernion, N. Ruiz-Camacho, J. Cortet, C. Pernin, C. Villenave, R. Chaussod, F. Martin-Laurent, A. Bispo, D. Cluzeau (2013). The impact of agricultural practices on soil biota: A regional study. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 271-284
- Rumpel, C., Chabbi, A., & Marschner, B. (2011). Carbon storage and sequestration in subsoil horizons : knowledge, gaps and potentials. In R. Lal, K. Lorenz, R. F. Hüttl, B. U. Schneider, & J. von Braun (Eds.), *Recarbonization of the Biosphere: Ecosystems and the global carbon cycle* (pp. 445–461). IASS Potsdam, Springer.
- Rutgers, M., A. Orgiazzi, C. Gardi, J. Römcke, S. Jänsch, A.M. Keith, R. Neilson, B. Boag, O. Schmidt, A.K. Murchie, R.P. Blackshaw, G. Pérès, D. Cluzeau, M. Guernion, M.J.I. Briones, J. Rodeiro, R. Piñeiro, D.J. Díaz Cosín, J.P. Sousa, M. Suhadolc, I. Kos, P.H. Krogh, J.H. Faber, C. Mulder, J.J. Bogte, H.J. van Wijnen, A.J. Schouten, D. de Zwart. (2016) Mapping earthworm communities in Europe. *Applied Soil Ecology*, Volume 97, January 2016, Pages 98-111
- Saffih-Hdadi K. et B. Mary, 2008. Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology & Biochemistry* 40. 594–607
- Villenave C., A. Jimenez, M. Guernion, G. Pérès, D. Cluzeau, T. Mateille, B. Martiny, M. Fargette, J. Tavoillot, 2013. Nematodes for soil quality monitoring: results from the RMQS BioDiv programme. *Open Journal of Soil Science*. 3, 30-45
- Weeks, J. M. (1995). The value of biomarkers for ecological risk assessment: academic toys or legislative tools? *Applied Soil Ecology*, 2(4), 215–216. [http://doi.org/10.1016/0929-1393\(95\)00072-2](http://doi.org/10.1016/0929-1393(95)00072-2)

Cartographie de la biodiversité lombricienne à l'échelle UE

M. Rutgers, A. Orgiazzi, C. Gardi, J. Römcke, S. Jänsch, A.M. Keith, R. Neilson, B. Boag, O. Schmidt, A.K. Murchie, R.P. Blackshaw, G. Pérès, D. Cluzeau, M. Guernion, M.J.I. Briones, J. Rodeiro, R. Piñeiro, D.J. Díaz Cosín, J.P. Sousa, M. Suhadolc, I. Kos, P.H. Krogh, J.H. Faber, C. Mulder, J.J. Bogte, H.J. van Wijnen, A.J. Schouten, D. de Zwart. (2016) Mapping earthworm communities in Europe. *Applied Soil Ecology*, Volume 97, January 2016, Pages 98-111

European Atlas of Soil Biodiversity (2010)

S. Jeffery, C. Gardi, A. Jones, L. Montanarella, L. Marmo, L. Miko, K. Ritz, G. Peres, J. Römcke and W. H. van der Putten (eds.); Artz, R., Anastasiou, D., Arrouays, D., Bastos, A. C., Bendetti, A., Bispo, A., Brandmayr, P., Broll, G., Bunning, S., Castracani, C., Campbell, C., Cluzeau, D., Coates, D., Creamer, R., Diafas, I., Durrant, T., Foissner, W., Fritz, G. B., Gardi, C., Gemmill-Herren, B., Graefe, U., Grasso, D., Hol, G., Hoogmoed, M., Jabiol, B., Jeffery, S., Jimenez, J. J., Hedlund, K., Krogh, P. H., Lemanceau, P., Licona-Manzur, C., Luster, J., Maistrello, L., Marmo, L., Menta, C., Miko, L., Mulongoy, K. J., Neilson, R., Nienstedt, K., Nilesen, U., Olazabal, C., Pagliai, M., Pawlik-Skowronska, B., Pérès, G., Ponge, J.-F., van der Putten, W., Ritz, K., Ranjard, L., Roberti, R., Römcke, J., Rutgers, M., Sartori, G., Schill, R. O., Sousa, J. P., Stephenson, S., Taiti, S., Taylor, A., Verheijen, F., Wall, D., Wolowski, K., Zanella, A. (contributors European Atlas of Soil Biodiversity). European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 128P

GLOSSAIRE

ACTA : Les instituts techniques agricoles

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AMG : modèle (acronyme issu du nom de ses auteurs : Andriulo, Mary, Guérif)

APCA : Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture

ANSES : Agence Nationale de sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du Travail

BDAT : Base de données d'analyse de sol (programme du GIS sol)

C : Carbone

CASDAR : compte d'affectation spéciale « développement agricole et rural »

CEC : Capacité d'échange en cations

CIPAN : Cultures intermédiaires pièges à nitrates

DEPHY : réseau de fermes engagées dans le programme écophyto du MAAF

DGPE : Direction générale de la performance économique et environnementale (MAAF)

Fe : Fer

GES : Gaz à effet de serre

IDELE : Institut de l'élevage

INRA : Institut national de la Recherche Agronomique

Irstea : Institut national de recherche en sciences et technologie pour l'environnement et l'agriculture

ISARA : Institut supérieur d'agriculture et d'agroalimentaire Rhône-Alpes

ISO : International Standard Organisation (normalisation internationale)

JRC : Joint Research Center (centre commun de recherches de la commission européenne)

K : Potassium

LADYSS : Laboratoire Dynamiques sociales et recomposition des espaces

LSV : Laboratoire Spécification et Vérification

MAAF : Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

MOP : matière organique particulaire

MOV : fraction vivante des matières organiques

N : Azote

NF : Norme Française

OAB : Observatoire Agricole de la Biodiversité

P : Phosphore

PCAET : Plan climat air énergie territorial

pH : potentiel hydrogène (apprécie le niveau d'acidité/basicité)

PIA : Programme d'investissements d'Avenir

PRO : Produits résiduaire organiques

SOERE : Systèmes d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement

RITTMO Agroenvironnement :

RMQS : Réseau de Mesures de la qualité des sols (programme du GIS sol)

RPG : Registre parcellaire graphique

RRP : Référentiel régional pédologique (programme du GIS sol)

ANNEXE 1 : NORMES

Description	Norme	Notes
<i>Normes pour les teneurs en Carbone</i>		
Carbone (C) total et carbone organique par correction calcaire (g/kg)	NF ISO 10694	Méthode Dumas - méthode de combustion sèche -. La présente Norme internationale prescrit une méthode de dosage du carbone organique et du carbone total du sol après combustion sèche. La teneur en carbone organique est déterminée à partir de cette dernière valeur après correction en raison des carbonates présents dans l'échantillon. Si ces derniers sont éliminés au préalable, on effectue le dosage du carbone organique directement. La présente Norme internationale est applicable à tous les types d'échantillons de sol séchés à l'air.
Carbone organique (g/kg)	NF ISO 14235	La méthode Walkley-Black repose sur le principe que le bichromate de potassium oxyde le carbone contenu dans le sol. Le bichromate de potassium change de couleur selon la quantité de produits réduits et ce changement de couleur peut être comparé à la quantité de carbone organique présent dans le sol. Cette méthode permet de mesurer le carbone organique. Elle ne peut être utilisée si les sols contiennent plus de 20 % de matière organique.
Carbone organique (g/kg)	AFNOR X 31-109	Méthode Anne. Oxydation de la matière organique par une quantité en excès de dichromate de potassium en milieu sulfurique. L'oxygène consommé est proportionnel au carbone. La détermination de la teneur en carbone organique est faite par spectrométrie des ions chromiques formés.
Carbone minéral (calcimétrie) (g/kg)	NF ISO 10693	Taux de carbonates dans les sols
<i>Normes pour les teneurs en azote</i>		
Azote (N) total (g/kg)	NF ISO 13878	Méthode Dumas. Détermination de la teneur totale en azote par combustion sèche ("analyse élémentaire").
Azote (N) total (g/kg)	NF ISO 11261	Méthode de Kjeldahl.
Azote nitrique (NO_3^- , NO_2^-) (mg/kg)	NF ISO 14256	Dosage des nitrates, des nitrites et de l'ammonium dans des sols bruts par extraction avec une solution de chlorure de potassium
Azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) (mg/kg)	NF ISO 14256	Dosage des nitrates, nitrites et ammonium dans des sols bruts par extraction par une solution de chlorure de potassium.
<i>Norme ISO mesures optiques</i>		
Teneur en carbone et azote	ISO 17184:2014 Qualité du sol --	Cette norme décrit une méthode de dosage du carbone et de l'azote dans les sols par mesurage direct de spectres

	Dosage du carbone et de l'azote par spectrométrie proche infrarouge (SPIR)	d'échantillons dans le domaine spectral proche infrarouge. Les spectres sont évalués par un modèle d'étalonnage approprié issu des résultats obtenus avec des méthodes de référence.
<i>Normes pour les Collemboles et les Acariens</i>		
Indicateurs des Collemboles et des Acariens	ISO 23611-2-2004	les microarthropodes sont extraits par voie sèche grâce à un extracteur de type Mc Fadyen. Les animaux, initialement collectés dans l'acide benzoïque, sont ensuite transférés dans l'alcool à 70%. Les comptages sont effectués sous la loupe binoculaire.
<i>Fractionnement de la matière organique</i>		
Fractionnement de la matière organique	NF X31-516	Fractionnement granulodensimétrique des matières organiques particulaires du sol dans l'eau. Le carbone organique et l'azote total sont déterminés sur les 3 fractions obtenues, par la mesure sur les fractions 50-200 µm et 200-2000 µm, par le calcul sur la fraction 0-50 µm. La proportion de carbone organique et d'azote total dans chacune des fractions, ainsi que leur rapport C/N respectif, permettent une caractérisation fine de la matière organique du sol. La fraction fine (0-50 µm) est considérée comme la matière organique humifiée (stable). Les fractions grossières sont assimilées à la matière organique labile (50-200 µm) et la matière organique fraîche issue des résidus de culture (200-2000 µm).
<i>Normes et méthode pour la nématofaune.</i>		
Analyse de nématofaune	NF EN ISO 23611	Au laboratoire, les nématodes sont extraits des échantillons de sol par élutriation (séparation des nématodes des autres particules du sol par densité dans un flux d'eau) suivi d'un passage actif sur filtre de ouate. Les nématodes sont ensuite dénombrés sous loupe binoculaire. Après fixation, ils sont identifiés (familles et/ou genres) par microscopie optique selon la norme. Ce travail sert à obtenir un tableau d'abondance des différents taxons de nématodes servant de base pour le diagnostic.

Récapitulatif des méthodes biologiques

Objet de la norme	Norme, année	Organismes
Plan d'échantillonnage	ISO 23611-6:2012	Prélèvement des invertébrés du sol Partie 6 : Lignes directrices pour la conception de programmes d'échantillonnage des invertébrés du sol
Conservation des échantillons	ISO 10381-6:2009	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
Abondance et diversité des microorganismes	ISO 14240-1:1997	Détermination de la biomasse microbienne du sol Partie 1 : Méthode par respiration induite par le substrat
	ISO 14240-2:1997	Détermination de la biomasse microbienne du sol Partie 2 : Méthode par fumigation-extraction
	ISO/TS 29843-1:2010	Détermination de la diversité microbienne du sol Partie 1 : Méthode par analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA) et par analyse des lipides éther phospholipidiques (PLEL)
	ISO/TS 29843-2:2011	Détermination de la diversité microbienne du sol Partie 2 : Méthode par analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA) en utilisant la méthode simple d'extraction des PLFA
	ISO 11063:2012	Méthode pour extraire directement l'ADN d'échantillons de sol
	ISO/DIS 17601:2015	Estimation de l'abondance de séquences de gènes microbiens par amplification par réaction de polymérisation en chaîne (PCR) quantitative à partir d'ADN directement extrait du sol
Diversité de la faune du sol	ISO 23611-1:2006	Prélèvement des invertébrés du sol Partie 1 : Tri manuel et extraction au formol des lombriciens
	ISO 23611-2:2006	Prélèvement des invertébrés du sol Partie 2 : Prélèvement et extraction des microarthropodes (Collembola et Acarina)
	ISO 23611-3:2007	Prélèvement des invertébrés du sol Partie 3 : Prélèvement et extraction des enchytréides
	ISO 23611-4:2007	Prélèvement des invertébrés du sol Partie 4 : Prélèvement, extraction et identification des nématodes du sol
	ISO 23611-5:2011	Prélèvement des invertébrés du sol Partie 5 : Prélèvement et extraction des macro-invertébrés du sol
Activité des microorganismes des sols	ISO 14238:2012	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

	ISO 14239:1997	Méthodes de mesure de la minéralisation de produits chimiques organiques dans le sol sous conditions aérobies, au moyen de systèmes d'incubation de laboratoire
	ISO 16072:2002	Méthodes de laboratoire pour la détermination de la respiration microbienne du sol
	ISO 17155:2012	Détermination de l'abondance et de l'activité de la microflore du sol à l'aide de courbes de respiration
	ISO/TS 22939:2010	Mesure en microplaques de l'activité enzymatique dans des échantillons de sol en utilisant des substrats fluorogènes
	ISO 23753-1:2005	Détermination de l'activité des déshydrogénases dans les sols Partie 1 : Méthode au chlorure de triphényltétrazolium (CTT)
	ISO 23753-2:2005	Détermination de l'activité des déshydrogénases dans les sols Partie 2 : Méthode au chlorure de iodotétrazolium (CIT)
Activité de la faune du sol	ISO 18311: 2015	Méthode pour tester les effets des contaminants du sol sur l'activité alimentaire des organismes vivant dans le sol Test Bait-lamina