

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 juin, septembre et décembre 2016.

Les auteurs principaux sont Francesca Degan – ACTA, Antonio Bispo – ADEME, Claire Chenu – AgroParisTech, Benjamin Balloy – APCA , et Laure Metzger – RITTMO. Daniel Cluzeau – Université Rennes1 ainsi que les personnes en charge du dossier au MAAF (DGPE et DGER). L'ensemble des nombreux contributeurs sont remerciés pour leurs apports et conseils.

Ce document correspond à la version mise en consultation pour révisions et compléments le 15 décembre 2016. Il a vocation à être ensuite publié sous une forme illustrée, à destination d'un plus large public, en 2017.

Champ traité et mandat du groupe d'experts

L'objectif du présent 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 évaluant ce statut dans les territoires 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 respectivement :

- 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 la méthode et de ses résultats ;
- l'échelle de pertinence et les incertitudes sur les résultats ;
- les avantages et inconvénients.

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. Il n'avait pas pour mandat de se prononcer en opportunité sur ces politiques publiques.

TABLE DES MATIÈRES

INDICATEURS : DÉFINITIONS, ÉCHELLES ET RÉFÉRENTIELS.....	5
<u>1.VARIABLES ET INDICATEURS QUANTITATIFS ET QUALITATIFS DES MATIÈRES ORGANIQUES ET DES ÉLÉMENTS MAJEURS CARBONE ET AZOTE.....</u>	8
1.1.Méthodes classiques.....	8
• 1.1.1.Teneur en carbone.....	8
• 1.1.2.Teneur en azote.....	9
• 1.1.3.C/N.....	10
• 1.1.4.Fractionnement granulométrique des matières organiques.....	11
• 1.1.5.Stocks de carbone, d'azote ou de matière organique des sols.....	12
1.2.Méthodes en développement.....	14
• 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).....	16
• 1.3.1.Pour analyser le C des sols.....	16
• 1.3.2.Méthode Hérody.....	16
<u>2.MÉTHODES RELATIVES À L'ÉTAT BIOLOGIQUE DU SOL.....</u>	17
2.1.Bioindicateurs microbiologiques (<i>partie encore en cours de rédaction</i>).....	18
• 2.1.1.Respiration du sol7	18
• 2.1.2.Biomasse microbienne (méthode par fumigation-extraction)10.....	19
• 2.1.3.Activité enzymatique (ex : essais Biolog et autres analyses individuelles).....	20
• 2.1.4.Biomasse moléculaire microbienne du sol.....	21
• 2.1.5.Diversité taxonomique microbienne.....	22
2.2.Bioindicateurs faunistiques.....	24
• 2.2.1.Lombriciens.....	24
• 2.2.2.Nématofaune (groupe très diversifié, occupant toutes les niches possibles, dont parasites).....	26
• 2.2.3.Microarthropodes du sol 22.....	27
2.3. Indicateurs complémentaires.....	28
• 2.3.1.Test bêche.....	28
2.4.Indicateurs indirects.....	29
• 2.4.1.Indicateur relatif à la stabilité structurale des sols.....	29
• 2.4.2.Litter-bag, tea bag, bait lamina.....	29
<u>3.SUIVI DE L'EFFET DES PRATIQUES SUR L'ÉTAT ORGANIQUE ET BIOLOGIQUE DU SOL.....</u>	31
3.1.Suivis possibles à partir d'indicateurs d'état.....	31

• 3.1.1. Indicateurs relatifs aux fractions de la matière organique (voir partie 1).....	31
• 3.1.2. Indicateurs microbiologiques (voir partie 2).....	32
• 3.1.3. Indicateurs d'activité enzymatique (voir partie 2).....	32
• 3.1.4. Indicateurs liés à la composition en lombriciens (voir partie 2).....	33
3.2. Outils d'aide à la décision mobilisant le modèle AMG à l'échelle parcellaire (outils Agrotransfert et Arvalis).....	33
<u>4. INDICATEURS DE POTENTIALITÉS D'ÉVOLUTION DES SOLS.....</u>	<u>35</u>
4.1. Indicateur relatif au potentiel de stockage du carbone :.....	36
<u>5. TRAVAUX EN COURS ET PROJETS À VENIR.....</u>	<u>38</u>
5.1. Observatoires de longue durée.....	38
• 5.1.1. Observatoire participatif des vers de terre (OPVT).....	38
• 5.1.2. L'observatoire Agricole de la Biodiversité (OAB)28.....	39
• 5.1.3. Réseau de surveillance biologique du territoire pour évaluer les effets non intentionnels des pratiques agricoles (Biovigilance SBT-ENI).....	39
• 5.1.4. Système d'Observatoires, d'Expérimentations et de Recherche.....	39
• 5.1.5. Autres essais longue durée.....	40
5.2. Projets aboutis ou en cours d'aboutissement:.....	41
• 5.2.1. CASDAR Agrinnov (Indicateurs de l'état biologique des sols agricoles & démarche collaborative) (2011-2014).....	41
• 5.2.2. Sys-Vit Sol-Vin (CasDAR IP 2011-2014).....	41
• 5.2.3. AMG (CasDAR RF 2011-2014).....	41
• 5.2.4. Outils mobilisant le modèle AMG à l'échelle territoriale : ABC'Terre (AAP Adème REACTIFF).....	42
• 5.2.5. BioIndicateurs des sols phase 1 (2005-2008) exemple du RMQS BioDiv33.....	42
• 5.2.6. BioIndicateurs des sols phase 2 (2009-2013) programme BIO234.....	43
• 5.2.7. Snowman SUSTAIN (Soil Functional Biodiversity and Ecosystem Services, a Transdisciplinary Approach) (Fr, NL) (2011-2014).....	43
• 5.2.8. INDIBIO (CasDAR RF 2011-2013, financements supplémentaires du CNIEL et d'INTERBEV35).....	43
5.3. Travaux en cours.....	44
• 5.3.1. ERANet - BioDiversa VineDivers (Biodiversity-based ecosystem services in vineyards: analysing interlinkages between plants, pollinators, soil biota and soil erosion across Europe) (Au, Ro, De, Es, Fr) (2015-2018)36.....	44
• 5.3.2. QUASAGRO (CasDAR IP 2015-2018).....	44
• 5.3.3. VITIFOREST (CasDAR 2015-2018).....	44
• 5.3.4. CNIEL - IDELE.....	45
• 5.3.5. ERA Net - BioDiversa SoilMan (Ecosystem services driven by the diversity of soil biota – understanding and management in agriculture) (De, Ro, Es, Se, Ee, Fr) (2017-2020)37.....	45
• 5.3.6. Microbioterre (CasDAR RT - 2017-2021).....	46

• 5.3.7.Réseau REVA (Réseau d'Expérimentation et de veille à l'innovation Agricole) (2017-2021).....	46
• 5.3.8.MYCOAGRA (CasDAR IP 2017-2021).....	46
• 5.3.9.Appel à projets R&D ADEME REACTIF (REcherche sur l'Atténuation du Changement ClimaTique par l'agrlculture et la Forêt).....	47
5.4.Travaux en projet.....	47
• 5.4.1.Appel à projets R&D ADEME GRAINE (Gérer, produire,valoriser les biomasses : pour une bioéconomie au service de la transition écologique et énergétique).....	47
• 5.4.2.Appel à Projets (AAP) INDUSTRIE ET AGRICULTURE ECO-EFFICIENTES du programme Investissements d'Avenir (PIA).....	47
• 5.4.3.Et aussi.....	47
<u>6.COMMENTAIRES COMPLÉMENTAIRES.....</u>	<u>48</u>
<u>7.CONCLUSION.....</u>	<u>50</u>
<u>BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE.....</u>	<u>51</u>
<u>GLOSSAIRE.....</u>	<u>56</u>
<u>ANNEXE 1 : NORMES.....</u>	<u>58</u>
<u>ANNEXE 2 – PLATE-FORMES ET PRESTATAIRES D'ANALYSES RELATIVES À L'ÉTAT ORGANIQUE ET BIOLOGIQUE DES SOLS RECOURANT À DES MÉTHODES NORMALISÉES (EN RÉFLEXION).....</u>	<u>62</u>

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 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 pour le diagnostic nécessite :

- de disposer d'un référentiel adapté à la question et à la variabilité du contexte environnemental (pédoclimat, usage, etc.). Les référentiels permettent d'interpréter les résultats des indicateurs selon la relation indicateur-fonction : 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 (production, environnemental...).

Le référencement des indicateurs et des paramètres calculés a deux objectifs principaux :

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

Les indicateurs utilisés pour le diagnostic doivent permettre de répondre à des questions sur l'état actuel du sol et sur les évolutions possibles selon les pratiques envisagées (service écosystémiques, etc.). 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 des sols qui seront modifiées et dans quel sens ?

Lorsqu'il s'agit d'indicateurs relatifs au stockage du carbone, le développement des indicateurs et des référentiels associés est possible grâce à des 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 PRO², rotation des CIPAN³, 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. La détection précoce des effets (par exemple d'un changement de pratiques) reste encore un défi pour certaines variables pédologiques. Les dégradations se constatent souvent plus rapidement que les évolutions positives.

La variabilité saisonnière des résultats est également à prendre en compte pour de nombreux indicateurs, en particulier biologiques : il est alors nécessaire de définir les périodes les plus propices à une faible variabilité intrinsèque des phénomènes observés.

Remarques additionnelles :

- 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 soulignée : la qualité de prise des échantillons est importante à prendre en considération ;
- la profondeur d'échantillonnage est importante à considérer car certains systèmes de culture (ex : réduction du travail du sol) peuvent engendrer une stratification de la matière organique sur l'horizon 0-5 cm ou 0-10 cm ;

2 - Produits résiduels organiques

3 - Cultures intermédiaires pièges à nitrates

- 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.

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).

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 ; Martin et al. 2011).

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats :

Rédaction en cours. (Précision 1,3-1,7% de la valeur mesurée)

Avantages / inconvénients :

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 la plupart des 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) mais ces quantifications ne sont pas traitées dans ce document.

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 (reliquats post récolte RPR), soit au début de l'hiver (reliquats entrée hiver – REH), soit à la sortie de l'hiver (reliquats 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 nitrate. 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 montrent la quantité d'azote potentiellement soumise à la lixiviation des pluies. L'évolution entre RPR et REH peut s'expliquer avec 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.

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 pour éviter la minéralisation.

Pour l'azote organique on soustrait de l'azote total de l'azote minéral.

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) ou par méthode Kjeldhal (NF ISO 11261) qui est une minéralisation par H_2SO_4 suivie d'une distillation de NH_3 puis d'une titration.

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).

Échelle de pertinence et les incertitudes sur les résultats :

Rédaction en cours (analyse élémentaire : répétabilité ≈10 %,

Avantages / inconvénients :

Rédaction en cours.

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); indicateur attestant de l'origine des matières organiques et de leur degré d'évolution.

Qui l'utilise et pour quel objectif

En sols agricoles et pour la matière organique des fertilisants, les rapports C/N sont utilisés pour caractériser les matières organiques et leur minéralisation. Les horizons labourés ont des valeurs C/N de l'ordre de 9-10 quand l'humification est bonne. Si le C/N est supérieur à 25, les micro-organismes vont puiser l'azote dans les réserves du sol pour dégrader la matière organique. En revanche, si le C/N est inférieur à 25, la minéralisation de la matière organique libère de l'azote, alors disponible pour les plantes. Cet indicateur a été très utilisé pour appréhender le comportement des matières organiques à la minéralisation, en particulier pour les fertilisants organiques.

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, le C/N du sol dépend du matériel végétal d'origine, 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 / inconvénients

Indicateur très simple à utiliser, de nombreuses références sont disponibles, 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 particulaires, 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 (> 200 μm ; 50-200 μm), 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.

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 (ou 40€ 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 / inconvénients

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 / 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, selon la formule :

$$C_{stock} = \sum_{i=1}^n p_i DA_i COS_i EG_i 10$$

Où p_i (en m) est l'épaisseur de l'horizon i à considérer ;
 DA (en T.m⁻³) la masse volumique apparente ;
 COS la teneur en carbone organique du sol (g.kg⁻¹) ;
 EG le pourcentage massique d'éléments grossiers (en % massique) ;
 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.

La masse volumique apparente et la teneur en carbone organique étant généralement corrélées (surtout pour les fortes teneurs en carbone) il est préférable en théorie de réaliser les mesures de carbone et de masse volumique sur les mêmes échantillons. En pratique, ceci n'est pas toujours réalisable pour des raisons de temps de travail, ce qui peut conduire à des biais lors de l'estimation des stocks moyens.

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. 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 mais l'hétérogénéité d'une parcelle peut conduire à devoir réaliser la mesure en plusieurs emplacements).

Les stocks sont le plus souvent estimés uniquement dans les horizons superficiels de sol (0-30 cm) or les stocks des horizons inférieurs participent également au stockage et aux évolutions de ce dernier (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 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 : 100 échantillons / parcelle pour observer des variations sur 5 ans). L'ordre de

grandeur de la précision pour une analyse en routine en conseil exploitant est plutôt de l'ordre de 20 %. La précision relative moyenne sur les placettes du RMQS (25 échantillons mélangés sur 400 m²) a été estimée à 11%.

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

- la standardisation des méthodes pour déterminer le stock de carbone (teneur en carbone, mesures de la masse volumique apparente et des 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 ;
- la forte variabilité liée à l'hétérogénéité spatiale des stocks de carbone par rapport à la faible variabilité temporelle.

Le principal défi concerne la diminution des incertitudes dans le calcul des stocks. Outre les incertitudes déjà mentionnées pour la mesure de la teneur en C et N organiques, l'incertitude liée à la masse volumique apparente est la deuxième source d'incertitude après la profondeur de prélèvement. On pourra en particulier se référer au manuel du RMQS.

Avantages / inconvénients :

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.

Les incertitudes de mesure des stocks organiques (particulièrement dus à la mesure ou l'estimation de la masse volumique apparente, leur forte variabilité spatiale, ainsi que leur lente évolution temporelle font que ces indicateurs apparaissent actuellement très peu pertinents pour évaluer l'impact d'un changement de pratiques sur le court terme (< 5-10 ans).

Les évolutions temporelles sont 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 5 à 10 ans 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 :

Déjà bien opérationnel : teneur C et N, teneur en matière organique, texture, teneur en carbonates. En utilisant 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).

En développement : qualité des matières organiques.

Cette mesure peut permettre de produire des indications rapides, nombreuses et peu coûteuses, sous réserve de disponibilité de la calibration pour la situation mesurée.

En ce qui concerne les sols, les méthodes ne sont utilisées que dans le champ de la recherche, cependant la grande polyvalence de l'outil pourrait permettre à terme de faire de multiples déterminations différentes avec un seul outil et une seule analyse et donc de baisser le coût d'analyse.

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, via des capteurs embarqués sur le terrain (agriculture de précision) ou encore par télédétection (sur sol nu).

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

Une norme internationale existe. 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 sols du RMQS ont été analysés par ces méthodes (Grinan *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 / inconvénients :

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 sans 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 ne peuvent être mises en œuvre que lorsque le sol est nu.

Grands potentiels de développement. 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 de plusieurs dizaines d'années. Potentiellement utilisable pour quantifier les matières organiques stables / labiles dans les sols.

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/

La méthode est couramment utilisée pour la prospection pétrolière ainsi que pour la géochimie organique. En revanche, ses 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.

Stade recherche pour l'instant mais potentialités fortes.

Échelle de pertinence et incertitudes sur les résultats

A déterminer.

Avantages / inconvénients :

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).

Teneur en C – méthode 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 (Skjemstad *et al.* 2006 ; Tirol-Padre et Ladha, J. K. (2004) sensible qu'une quantification des matières organiques particulières.

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 (Péres *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 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 biologique⁴ :

- 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 ;
- 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 ;
- 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 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 bioindicateurs permettent de caractériser l'état et de révéler les modifications d'un écosystème (Blandin, 1986). Les indicateurs biologiques (bioindicateurs) 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, floristique⁵ et microbiologiques.

Bioindicateurs faunistiques :

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

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

- 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 microbiologiques⁶.

2.1. Bioindicateurs microbiologiques (partie encore en cours de rédaction)

Si l'on veut caractériser l'état biologique d'un sol, il est souhaitable de coupler systématiquement une mesure quantitative (ex : le C microbien par fumigation-extraction) à une mesure d'activité (ex respiration, biolog...) car ces deux paramètres ne sont pas corrélés.

2.1.1. Respiration du sol⁷

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 OXYTOP⁸, 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.

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

8 - Marque déposée. WTW, Weilheim, Allemagne

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

7 - Normalisation, cf le tableau annexé

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 / inconvénients

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 tous⁹.

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.

9 - 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)¹⁰

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).

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 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 / inconvénients :

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 ».

¹⁰ - Normalisation, cf le tableau 6 annexé

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 techniques sont disponibles pour mesurer l'activité enzymatique dans les sols. Ces méthodes diffèrent par la nature des substrats, les conditions opératoires, les temps d'incubations et les méthodes de détection (colorimétrie, fluorimétrie ou radiomarquage). En jouant sur les substrats, on peut cibler des activités enzymatiques spécifiques (N, soufre, phosphore, ...).

L'analyse des fluorescéine diacétate (FDA) hydrolases effectuée par différents laboratoires est plus intégratrice ; la molécule FDA est hydrolysée par un très large spectre d'enzymes (acétyl-estérases, estérases, lipases, protéases). La méthode Biolog repose sur l'utilisation de microplaques commerciales dans lesquelles des substrats sont introduits pour mesurer en un seul passage plusieurs activités.

Il s'agit de tests dits métaboliques, qui permettent de mesurer une activité de dégradation d'un ou plusieurs types de substrats, sans identification précise des enzymes mises en jeu (probablement plusieurs). Cette activité métabolique ne mesure que celle due aux bactéries du sol. Cette technique nécessite un calibrage au niveau de la concentration bactérienne du sol avant la mise en incubation de l'extrait du sol dans les microplaques.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Cette mesure identifie le potentiel de dégradation catabolique. L'effet des pratiques culturales est mis en évidence par les combinaisons des indicateurs des activités enzymatiques différentes. À l'issue du projet bioindicateurs ADEME, les rotations culturales, le travail du sol et les amendements organiques ont un effet significatif sur de 6 à 13 indicateurs.

Comment s'effectue la mesure :

Méthode de laboratoire, par extraction à l'eau des enzymes actifs et des bactéries dans le sol. Placés au contact d'un substrat spécifique dans des micro-plaques standardisées (Biolog) ou dans des micro-plaques préparées à façon pour suivre un ensemble d'activités.

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

Les normes existent, certains laboratoires la réalisent et il existe une plate-forme de prestation de services, mais il n'existe pas de référentiel pour l'interprétation.

Les plaques sur le marché ont été développées en particulier pour une application environnementale (biodégradabilité de certaines substances polluantes notamment). Le développement de plaques spécifiques pour les enjeux agricoles est en cours. Les méthodes sont surtout utilisées dans les cadres de projets de recherche ciblés, notamment pour mettre en évidence l'effet de l'apport d'amendements organiques au sol. Un indice multienzymatique permettra de répondre aux questions agronomiques et environnementales et de pallier le manque actuel de référentiels pour le conseil.

Dans le cas de la FDA hydrolase, l'indicateur d'activité métabolique est bien corrélé avec la biomasse microbienne, et rend bien compte de l'apport de matières organiques.

Une méthode de mesure en microplaques de plusieurs enzymes (portée par une équipe française), est en cours de normalisation.

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). L'indicateur permet 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. Les résultats peuvent être utilisés à l'échelle de la parcelle ou à une échelle plus globale, si les échantillons sont accompagnés par des informations sur le contexte environnemental (type de sol, climat, pratiques etc.).

Avantages / inconvénients :

Les tests sont faits sur une suspension aqueuse de sol ou sur un extrait à l'eau. Dans le second cas, on ne mobilise donc qu'une partie des activités enzymatiques du sol.

Cette méthode, en mobilisant plusieurs activités enzymatiques différentes, permet

d'appréhender le fonctionnement des cycles biogéochimiques des sols, ce qui est prometteur à terme.

La vision d'ensemble sur des cycles de dégradation de la matière organique est l'avantage principal de ce type de mesure. 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 pouvoir être automatisées à court terme.

Cependant, le manque de situations de référence ne permet pas encore l'interprétation des résultats pour le conseil. 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 molécules les plus dégradées est intéressante pour une interprétation agronomique (pratiqué par certains laboratoires).

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 Genosol¹¹ (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

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

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. 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.

Avantages / inconvénients :

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 pour l'instant. Permet de quantifier la biomasse et 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 Biodiversité¹².

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 AgrInnov 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 ainsi qu'un projet en cours de dépôt pour industrialiser différents modes opératoires concernant les bioindicateurs. Voir en partie 5 pour le détail des projets.

Fort potentiel en termes d'indicateurs et de diagnostic biologiques, en cours de transfert aux agriculteurs via le projet AgrInnov 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 spécifiques¹³. 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 (« 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 / inconvénients :

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 reste délicate (NB : le projet AgrInnov 2012-15 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.

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

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

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'effet et d'impact qui rendent 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 nationale¹⁴, 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.

14 - <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 écologiques (de 3 à 8 groupes)
- taxonomiques : richesse¹⁵ (nombre de taxons différents), indices de diversité¹⁶ et d'équitabilité¹⁷ (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 un projet de recherche en cours, visant à établir un lien entre lombriciens et carbone du sol (thèse en cours). L'étude porte sur les contributions des différentes espèces à l'intégration du carbone aux complexes organo- minéraux et aux différents horizons du sol.

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

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

16 - La diversité est exprimée par différentes indices (Shannon, Simpsons, etc.). Ils indiquent avec une valeur numérique d'autres paramètres comme la richesse ou l'équitabilité.

17 - L'équitabilité au sein d'une communauté évalue la répartition du nombre des individus par espèce. La valeur est proche de 1 quand les répartitions sont régulières, donc il n'y a pas d'espèces dominantes.

les lombriciens, (5) veille technique pour orienter de futures recherches, ...

Comment s'effectue la mesure¹⁸ :

Le protocole pour les travaux de recherche utilise le formol pour faire remonter les vers de terre à la surface (norme ISO 23611-1). Dans l'un des protocoles participatifs ou collaboratifs, le formol est remplacé par de la moutarde : cela consiste à utiliser au champ une solution de 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 ligne¹⁹ ; 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 participant²⁰.

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 européens.

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 programmes²¹. 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 / inconvénients :

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.

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

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

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

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

La mesure est contrainte par les périodes et les conditions du milieu (sol non gelé, période d'activité des lombriciens etc.). Un effet lié au

préleveur sur le tri manuel est augmenté pour les individus de très petite taille.

2.2.2. Nématofaune (groupe très diversifié, occupant toutes les niches possibles, dont parasites)

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 et phytophages vivants 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 fonctionnelle 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 : barre-coding).

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 / inconvénients :

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. Microarthropodes du sol ²²

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

Les indicateurs mesurés par la méthode sont :

- abondance des taxons (nb individus/m²) :
 - Acariens : Oribatida, Gamasida et Actinedida ;
 - Collembolés : par espèce ;
- abondance, richesses et diversité des groupes fonctionnels (nb individus/m²) :
 - Collembolés : 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 collembolés, abondance de chacun des 3 groupes fonctionnels de collembolés (épi- hémi- et eu-édaphiques), abondance totale des acariens, abondance des « autres Arthropodes », abondance total de microarthropodes, richesse en espèces de Collembolés, diversité spécifique et équitabilité des Collembolés (indice de Shannon).

Qui l'utilise et pour quel objectif

Acariens et Collembolés 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 sur les normes pour les Collembolés 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 / inconvénients :

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.

22 - https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/download/fiches-outil/fiche_outil_8_microarthropodes_du_sol.pdf

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. 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 / inconvénients:

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.

2.4. 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.

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.

Avantages / inconvénients :

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.

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)²³. L'initiative est portée par l'Union Européenne (European Network on Soil Awareness). Deux types de thés sont utilisés pour quantifier à la fois la masse de matières organiques labiles dégradée et la masse stabilisée.

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

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 / inconvénients :

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. 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 ou l'appréciation d'évolutions sur les mêmes parcelles à intervalles de temps de plusieurs années.

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 constituer une valeur approchée des 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 coûteuse²⁴ et le matériel existe dans certains laboratoires de recherche. D'autres méthodes permettent de séparer les différents pools de matière organique, comme la méthode 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. La méthode de l'hydrolyse ne fonctionne pas.

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, nématodes et 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.

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'IDELE (Institut de l'Élevage) et financé par le CNIEL (cf partie 5) vise à disposer 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.

24 - Prix de revient laboratoire 12 €

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.

3.2. 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 AMG²⁵ (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 :

L'outil est disponible en ligne gratuitement sous forme de démonstrateur, les abonnés peuvent utiliser des fonctions avancées. 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 (échéance en 2017 ; valorisant 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.

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 est 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. -). Dans ces cas les résultats d'amélioration des stocks seraient sous-estimés.

Avantages / inconvénients :

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 des niveaux variables de teneur en matière organique. Ces teneurs sont susceptibles d'évoluer en fonction de la nature et de l'état initial du sol et sous l'effet des pratiques agricoles ou de changements climatiques.

Par exemple, les prairies présentent en général des stocks de carbone beaucoup plus élevés que les terres en production de grandes cultures²⁶. De ce fait, selon leur historique de gestion, 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. Une parcelle de céréales précédemment en prairie permanente présentera ainsi un niveau élevé de matière organique mais ce niveau décroîtra rapidement après la mise en culture annuelle et ce malgré la mise en œuvre de bonnes pratiques. Les mêmes pratiques, appliquées à la même culture de céréales cette fois installée sur une 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).

Un objectif de d'évolution de l'état des sols doit donc tenir compte de l'écart entre l'état observé et un état considéré comme une référence constituant un objectif pour un type de sol, une région, un historique et un système de culture considéré. Dans le cas du carbone, les stocks sont 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.

Ce chapitre abordera donc aussi bien les indicateurs permettant de situer le potentiel de progression du stock (un sol ayant déjà atteint un niveau élevé ne pourra guère stocker plus alors qu'un sol présentant une faible teneur initiale en matière organique pourra accroître son stock de carbone) que les indicateurs permettant d'appréhender les cinétiques globales de stockage/déstockage et de stabilité du carbone.

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.

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.

26 - Source doc Ademe carbone des sols agricoles

4.1. Indicateur relatif au potentiel de stockage du carbone :

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.

Qui l'utilise et pour quel objectif :

Actuellement, il s'agit d'un outil de recherche, élaboré dans un premier temps pour des besoins de diagnostics dans le cadre des politiques publiques (plans climat air énergie territoriaux). Ce sont les outils 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.

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

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

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.

A ces méthodes, évoquées ici car 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

5.1. Observatoires de longue durée

5.1.1. Observatoire participatif des vers de terre (OPVT)

En 2010, suite à les programmes de recherche ADEME sur les bioindicateurs des sols, des questions sociétales ont été formulées par les acteurs du développement agricole et les institutions :

- Comment disposer de valeurs de référence pour les communautés lombriciennes dans les principaux sols agricoles sans disposer de moyens propres très importants ?
- Comment faire très vite pour intervenir en conseils de gestion avant que le dernier ver de terre n'ait disparu dans telle ou telle parcelle agricole ?
- Comment développer le référentiel national, tout en transférant à tous ces utilisateurs de sols un outil d'autoévaluation des pratiques et en leur proposant une aide (et un conseil) à la gestion de la biodiversité des sols ?

L'Université de Rennes 1 a initié en 2011 un Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT) dont l'objectif principal est d'acquérir, à l'aide d'outils d'évaluation simplifiée, des références nationales, en termes de diversité (sub-)spécifique et d'abondance lombricienne, pour les différents contextes pédoclimatiques et usages des sols français.

L'OPVT permet aux gestionnaires des sols :

- de réaliser un état des lieux d'un site ou d'un territoire (land use) ;
- d'évaluer les impacts comparés de diverses pratiques (land management) ;
- d'évaluer une éventuelle diminution des pressions phytosanitaires ;
- d'évaluer un éventuel effet dépressif à court terme.

Cet outil d'auto-évaluation proposé par l'OPVT a évolué rapidement vers un outil d'évaluation des changements dans des réseaux de surveillance et autres champs d'expérimentation environnemental (espaces agricoles, naturels et urbains).

Cet observatoire a permis d'intégrer 900 observations par an, soit 4600 en 5 ans dont 33% en collaboratif, apportant ainsi des informations de biodiversité taxonomique dans tous les milieux.

En 3 années, l'OPVT a permis de comprendre que les sols urbains sont des sols spécifiques à haute valeur écologique pour les communautés lombriciennes : les richesses taxonomiques y sont supérieures (+50%) à celles observées en grandes cultures et en régions viticoles.²⁷

27 - https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php

5.1.2. L'observatoire Agricole de la Biodiversité (OAB)²⁸

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.

5.1.3. 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.

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.

5.1.4. Système d'Observatoires, d'Expérimentations et de Recherche

Les SOERE sont des Systèmes d'Observatoires, d'Expérimentations et de Recherche en Environnement labellisés par l'AllEnvi (Alliance nationale de recherche pour l'Environnement) dans le but de pérenniser ces infrastructures de recherche, de renforcer leur visibilité et de leur donner un rayonnement international.

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

Le SOERE PRO est un réseau de sites expérimentaux en plein champ, de longue durée, ayant pour objectif d'observer les effets de l'apport de Produits Résiduaux Organiques (PRO) sur les différents compartiments d'un système de grandes cultures. Ce réseau se compose de 5 sites : QualiAgro (Île-de-France), EFELE (Ille-et-Vilaine), La Bouzule (Lorraine), Couhins (Aquitaine) et Colmar (Alsace). Ces sites, conçus à l'échelle de la parcelle, permettent de mesurer, depuis plus de 10 ans pour certains, l'évolution sur le long terme des différents compartiments (sol, plantes, eau, air, PRO) d'un agrosystème soumis à épandage. Le SOERE PRO est piloté par l'INRA.

Le SOERE ACBB²⁹ a été conçu pour capter les évolutions à pas de temps long (> 20 ans) du système sol-végétation, de son environnement et des différentes rétroactions qui les gouvernent. Il étudie notamment les dynamiques conjointes et couplées des matières organiques des sols, des communautés microbiennes et de la végétation. Une des finalités de ce dispositif est de pouvoir quantifier les capacités de séquestration du C dans les sols selon les modalités anthropiques de gestion qui sont appliqués. Un ensemble constitué de 3 agro-écosystèmes sur 4 sites expérimentaux, géré en réseau, permet d'analyser une gamme étendue de modes d'occupation des sols, depuis les prairies permanentes de semi altitude à Theix-Laqueuille, jusqu'aux systèmes de culture annuels intensifs du bassin parisien à Mons en Chaussée, en passant par les systèmes mixtes d'alternance prairie-culture à Lusignan.

La liste des SOERE :

<http://www.allenvi.fr/groupe-transversaux/infrastructures-de-recherche/les-soere/liste-des-soere>

et des zones ateliers :

<http://www.allenvi.fr/groupe-transversaux/infrastructures-de-recherche/rza/%28langage%29/fre-FR>

5.1.5. Autres essais longue durée

Le projet SYPPRE³⁰ (Systèmes de Production Performants et Respectueux de l'Environnement) a comme objectif de contribuer au développement de systèmes rentables, productifs, à faibles impacts environnementaux. Mis en place depuis 2014, il est porté par trois ITA (ARVALIS, Terres Inovia et ITB).

Le projet repose sur une méthode originale, combinant un observatoire, des plate-formes expérimentales et des réseaux d'agriculteurs. Les plate-formes expérimentales se trouvent dans cinq milieux agricoles contrastés de grandes cultures : limons profonds de Picardie, terres de craie de Champagne, argilo-calcaires superficiels du Berry, argilo-calcaires des coteaux du Lauragais et terres humifères du Béarn. Les critères globaux pris en compte par les plate-formes sont : le produit brut/ha, l'énergie brute produite/ha, la marge pour le semis direct/ha, la consommation d'énergie, les émissions de GES, l'IFT³¹, la lixiviation de nitrate et l'évolution des stocks de carbone. Les analyses de sol effectuées sont nombreuses et sont constituées d'une part d'analyses pour décrire les sols et l'état initial (cartographie des sols, stock de carbone, etc.) et d'autre part d'analyses pour observer les évolutions successives et ainsi l'impact des pratiques.

Par exemple, les essais conduits sur les dispositifs expérimentaux de La Jaillière (44) et Jeu-les-Bois (36) ont permis de documenter l'évaluation de l'incidence d'apports réguliers d'engrais de ferme sur des indicateurs de fertilité physique, chimique et microbiologique des sols (Bouthier et al. 2015), en montrant en particulier que les apports répétés d'engrais de ferme ont un effet marqué sur les teneurs en carbone et azote organique ainsi qu'un effet sur la macroporosité de la couche labourée. D'autres essais portent sur des apports de composts urbains.

29 - <http://www.soere-acbb.com>

30 - <https://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/syppre-construire-ensemble-les-systemes-de-culture-de-demain-@/file/galleryelement/pj/30/c2/2d/1d/syppre2336672423368691077.pdf>

31 - *Indice de Fréquence de Traitement*

5.2. Projets aboutis ou en cours d'aboutissement:

5.2.1. CASDAR Agrinnov (Indicateurs de l'état biologique des sols agricoles & démarche collaborative) (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 ligne³². Ce site est actualisé régulièrement.

5.2.2. 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. AMG (CasDAR RF 2011-2014)

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.

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).

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

5.2.4. Outils mobilisant le modèle AMG à l'échelle territoriale : ABC'Terre (AAP Adème REACTIFF)

Le projet ABC'Terre (2013-2016) a donné un premier exemple de calcul du stock de carbone couplé aux émissions des GES à l'échelle territoriale (communauté de commune de 200 km² environ ou petite région agricole ou région naturelle). Le projet utilise le modèle AMG, avec des données spatialisées en entrée : reconstruction des rotations culturales grâce à l'outil RPG-explorer, informations sur les itinéraires culturaux issus de l'expertise et données des laboratoires d'analyse de terre.

Le projet résulte de l'articulation de cinq étapes :

- « agrosystèmes élémentaires » : reconstitution des combinaisons « Rotations x type de sol x type d'exploitation » formalisée et automatisée à l'aide de l'outil RPG-Explorer ;
- « état organique des sols » : reconstitution des informations spatialisées sur l'état organique des sols, nécessaires en entrée des calculs des bilans C organique des sols, puis GES ;
- « pratiques culturales » : reconstitution des pratiques culturales appliquées au sein des agrosystèmes élémentaires définis à l'étape précédente et nécessaires en entrée du calcul de bilan de carbone organique des sols, puis pour le calcul de bilan de GES. A l'issue de cette étape, on dispose des combinaisons « systèmes de culture reconstitués x types de sols x teneur en C organique » spatialisées sur le territoire d'étude ;
- « bilan C organique des sols » : calcul du bilan de carbone organique du sol par Simeos-AMG, pour chacun des agrosystèmes élémentaires de territoire définis à l'issue de RPG-Explorer, à partir des données réunies et combinées aux étapes précédentes ;
- « bilan GES » : réalise, pour chacun des agrosystèmes élémentaires du territoire, le calcul des différents postes d'émissions directes et indirectes d'un bilan GES intégrant le carbone organique des sols, à partir des sorties des trois étapes précédentes.

La suite de calcul n'est pas encore automatisée ; une partie importante d'expertise locale est nécessaire pour reconstruire les itinéraires techniques par rapport aux assolements. En revanche, cette méthode peut être appliquée à d'autres territoires pour compléter les références et répondre à des enjeux différents. La méthode est en développement. Le couplage avec des méthodes simulant les émissions à d'autres échelles spatiales serait envisageable (Clim'Agri par exemple).

5.2.5. BioIndicateurs des sols phase 1 (2005-2008) exemple du RMQS BioDiv³³

Les objectifs du projet étaient de :

- pallier le manque d'outils et de référentiels de mesure des caractéristiques biologiques des sols ;
- évaluer des paramètres définissant l'état de la biodiversité taxonomique et fonctionnelle à l'échelle régionale ;
- étudier les relations possibles entre les paramètres définissant la qualité d'un sol (pédologiques et physico-chimiques), son usage, ses modes de gestion et sa biodiversité ;
- identifier et proposer des paramètres biologiques utilisables par les acteurs de terrain ;
- valider des outils d'aide à la décision (proposition d'indicateurs pour différents utilisateurs).

33 - <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/programme-rmq-s-biodiv>

5.2.6. BioIndicateurs des sols phase 2 (2009-2013) programme BIO2

L'objectif du projet était de valider les paramètres définis en phase 1 (Bio1 cf 5.2.5) sur un même réseau de sites et modalités afin de :

- calibrer l'outil (le bioindicateur), c'est-à-dire le graduer : connaître l'amplitude des réponses à la présence d'un toxique ou à une modification du sol telle que le tassement, le changement d'usage, l'acidification... ;
- connaître la sensibilité de l'outil : distinguer les réponses liées aux variations naturelles des réponses liées à un toxique ou à une modification du sol ;
- connaître les limites d'utilisation de ces outils : certains seront plus adaptés pour mettre en évidence un impact lié la présence de polluants, d'autres à un changement d'usage... ;
- élaborer un premier référentiel permettant de faciliter l'interprétation des données ;
- juger de la possibilité d'utiliser des résultats issus de la biosurveillance des sols dans le cadre de la modélisation des transferts de contaminants et de l'évaluation des risques.

5.2.7. Snowman SUSTAIN (Soil Functional Biodiversity and Ecosystem Services, a Transdisciplinary Approach) (Fr, NL) (2011-2014)

Les objectifs de ce projet étaient de :

- comprendre en quoi les techniques de travail du sol simplifié impactent la diversité fonctionnelle du sol – maintien de la structure, matière organique, cycle des nutriments, régulation hydrique, filtration de l'eau, régulation des ravageurs – en comparaison du labour conventionnel ;
- quantifier les conséquences des systèmes en techniques de travail du sol simplifié sur les services écosystémiques de la production alimentaire et de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre ;
- évaluer la durabilité socio-économique des systèmes de culture en travail du sol simplifié ;
- développer et vulgariser les outils tels que des indicateurs de perturbation du sol et l'évaluation de la durabilité des systèmes de culture.

5.2.8. INDIBIO (CasDAR RF 2011-2013, financements supplémentaires du CNIEL et d'INTERBEV³⁵)

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).

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

35 - Interprofession Bétail et Viande

5.3. Travaux en cours

5.3.1. ERANet - BioDiversa VineDivers (Biodiversity-based ecosystem services in vineyards: analysing interlinkages between plants, pollinators, soil biota and soil erosion across Europe) (Au, Ro, De, Es, Fr) (2015-2018)³⁶

Les objectifs de ce projet sont :

- de déterminer en quoi les pratiques de gestion des vignobles et de leur environnement affectent les relations entre les réseaux trophiques de végétaux, les habitats des êtres vivants du sol, des pollinisateurs et en quoi ces groupes fonctionnels favorisent les services écosystémiques des paysages viticoles ;
- d'évaluer quels types de gestion de vignobles de différents niveaux de complexité de structure peuvent permettre les meilleurs compromis entre productivité et services écosystémiques ;
- de développer des conseils aux agriculteurs, acteurs et producteurs de politiques publiques pour la gestion des vignobles et de leurs abords permettant une durabilité du fonctionnement des écosystèmes, de la biodiversité et des productions viticoles de qualité et de rendements élevés.

5.3.2. 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.

5.3.3. VITIFOREST (CasDAR 2015-2018)

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

36 - <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/programme-vinedivers>

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.

5.3.4. CNIEL - IDELE

Un projet financé par le Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière (CNIEL) et piloté par l'Institut de l'Elevage (IDELE) a démarré en 2015 avec pour objectifs de fournir :

- des connaissances sur les impacts des pratiques agricoles sur la fertilité des sols ;
- des outils opérationnels intégrant cette fonction des sols.

Mené en partenariat avec le Laboratoire Agronomie et Environnement (UMR 1121 INRA-Université de Lorraine), le projet étudie l'utilisation de variables microbiologiques (biomasse et activités enzymatiques microbiennes) pour évaluer l'impact des pratiques agricoles sur la fertilité des sols.

Le but du projet est d'élaborer des conseils agronomiques pour le maintien et/ou le renforcement de la fertilité des sols dans les systèmes bovins laitiers.

5.3.5. ERA Net - BioDiversa SoilMan (Ecosystem services driven by the diversity of soil biota – understanding and management in agriculture) (De, Ro, Es, Se, Ee, Fr) (2017-2020)³⁷

Les objectifs de ce projet sont :

- d'explorer la biodiversité du sol en fonction des types de gestion et des contraintes régionales ;
- d'explorer l'impact de la biodiversité du sol sur le fonctionnement du sol et la fourniture de services écosystémiques ;
- de développer une approche intégrative des interactions et fournitures de services écosystémiques des sols induits par le mode de gestion ;
- d'évaluer les principaux biens et services que les sols fournissent à la société et l'impact des politiques publiques sur cette fourniture ;
- de comparer les résultats régionaux et les relier aux politiques publiques européennes de manière à ce que les résultats du projet SoilMan puissent être utiles aux décideurs et producteurs de politiques publiques.

37 - <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/programme-soilman>

5.3.6. 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.

5.3.7. Réseau REVA (Réseau d'Expérimentation et de veille à l'innovation Agricole) (2017-2021)

Il s'agit d'utiliser les outils AgrInnov en monitoring, en les couplant à des indicateurs qui permettent d'évaluer et de caractériser la performance économique des modèles agricoles (modèle agricole : l'ensemble des processus de production mis en œuvre dans une entreprise agricole). Il s'agit par ce travail d'identifier les modèles agricoles existants qui répondent déjà aux critères du développement durable au titre de la double performance, c'est-à-dire qui sont écologiquement et économiquement durables.

Dans le cadre du REVA, les agriculteurs travaillent en groupe et se comparent entre eux pour s'enrichir mutuellement de leurs points forts et faire évoluer leurs pratiques vers les modèles agricoles les plus performants.

5.3.8. 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.

5.3.9. Appel à projets R&D ADEME REACTIF (REcherche sur l'Atténuation du Changement Climatique par l'agriculture et la Forêt)

Plusieurs projets concernent le développement de connaissances et leurs transferts vers les acteurs. Sur plus d'une trentaine de projets financés, plus du tiers concerne l'étude des flux de gaz à effet de serre des sols et les pratiques permettant le stockage de carbone dans les sols, en prairies (ex : AEGES, P2C), forêts (ex : PicaSo) ou en grandes cultures (ex: SolGES, CSopra, EFEMAIR, ABCTerre, SOCLE). Ces projets, encore en cours, permettront de mieux intégrer le carbone des sols dans les processus de décision à l'échelle des productions, des filières, des territoires ou encore de la nation.

5.4. Travaux en projet

5.4.1. Appel à projets R&D ADEME GRAINE (Gérer, produire, valoriser les biomasses : pour une bioéconomie au service de la transition écologique et énergétique)

Plusieurs projets ont été déposés proposant par exemple d'étudier les services rendus par la matière organique des sols et les arbitrages aux échelles parcellaires et territoriales entre l'utilisation de biomasse à des fins énergétiques ou bien son retour au sol. Ces différents projets sont en cours d'expertise et s'ils sont retenus, débiteront en 2017.

5.4.2. Appel à Projets (AAP) INDUSTRIE ET AGRICULTURE ECO-EFFICIENTES du programme Investissements d'Avenir (PIA)

Un projet visant à développer une offre nationale de caractérisation agro-écologique des sols (intégrant notamment des indicateurs biologiques) a été déposé. La décision de financement devrait être prise durant le premier semestre 2017.

5.4.3. Et aussi

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 « agradé³⁸ ». 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.

38 - 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

- 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.
- Baize, D. (2006). Guide des analyses en pédologie (2e édition). Paris: INRA Edition.
- 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., Cluzeau, D., Creamer, R., Dombos, M., Graefe, U., Krogh, P., ... Römcke, 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>
- 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
- 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
- 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.
- 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.
- 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.
- 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>.
- 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.
- 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.
- 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
- Hassink, J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*, 191(1), 77–87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>
- 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
- 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.
- 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
- 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.
- MAAF Ecophyto (2014), Bulletin de liaison du réseau national de Biovigilance n°3 – Hiver 2013/2014, 11p
- 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.
- 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
- 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.
- 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., Menasseri 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., 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.
- 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., Vandembulcke, 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. Römbke, 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
- 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
- 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., & Nouaim-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.
- 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)
- 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>

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 résiduaux 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

ANNEXE 2 – PLATE-FORMES ET PRESTATAIRES D'ANALYSES RELATIVES À L'ÉTAT ORGANIQUE ET BIOLOGIQUE DES SOLS RECOURANT À DES MÉTHODES NORMALISÉES (*EN RÉFLEXION*)
