

# DISPOSER DE METHODES ABORDABLES, PRECISES ET ROBUSTES POUR LES INDICATEURS DE GESTION DES MATIERES ORGANIQUES DANS LES SOLS CULTIVES

Valé Matthieu<sup>1\*</sup>, Bouthier Alain<sup>2</sup>, Chaussod Rémi<sup>3</sup>, Cusset Elodie<sup>4</sup>, Deschamps Thibaud<sup>2</sup>, Houot Sabine<sup>5</sup>, Bennegadi-Laurent Nadia<sup>4</sup>, Le Net Justine<sup>1</sup>, Leclerc Blaise<sup>6</sup>, Perrin Anne-Sophie<sup>7</sup>, Recous Sylvie<sup>8</sup>, Riah-Anglet Wassila<sup>4</sup>, Roussel Pierre-Yves<sup>9</sup>, Trinsoutrot-Gattin Isabelle<sup>4</sup>

<sup>1</sup> AUREA AgroSciences, 45160 Ardon, <sup>2</sup> ARVALIS, 17700 Saint Pierre d'Amilly, <sup>3</sup> SEMSE, 21310 Viéville, <sup>4</sup> UNILASALLE, unité de recherche AGHYLE, 76130 Mont-Saint-Aignan, <sup>5</sup> INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 78850 Thiverval Grignon, <sup>6</sup> ITAB, 84160 Cucuron, <sup>7</sup> TERRES INOVIA, 34000 Montpellier, <sup>8</sup> INRAE, URCA, UMR FARE, 51100 Reims, <sup>9</sup> Chambres d'agriculture de Bretagne, 56000 Vannes,

\*Orateur et correspondant : [m.vale@aurea.eu](mailto:m.vale@aurea.eu)

Le sol abrite une abondante diversité de microorganismes qui assurent de multiples fonctions dans le sol. Ces microorganismes interviennent dans la transformation de la matière organique (MO) (minéralisation, humification) et la nutrition des plantes *via* le recyclage des éléments nutritifs comme l'azote, le soufre et le phosphore. La compréhension et la quantification de ces processus de transformation de la matière organique par les microorganismes, passe par l'analyse des différents pools de carbone et d'azote en lien avec les fonctions associées.

## I. Teneur et stock

L'analyse de terre de routine inclut quasi systématiquement une mesure de la teneur en carbone organique, par oxydation sulfochromique (méthode Anne, NF ISO 14235) ou combustion sèche (méthode Dumas, NF ISO 10694). Cette teneur peut renseigner sur la qualité physique des sols (stabilité de la structure, rétention en eau) et présente un rôle clé dans la fertilité chimique et biologique des sols. Pour autant il n'est pas simple de définir une teneur souhaitable ou critique, car elle n'est pas directement reliée au niveau de production végétale, comme le sont le pH eau ou la teneur en phosphore par exemple. La gestion du carbone organique du sol nécessite la mobilisation de modèles de bilan humique comme AMG (Clivot et al., 2019) qui permettent de prédire son évolution en fonction des conditions pédoclimatiques et du système de culture. La pertinence de la démarche repose sur l'estimation précise du stock de carbone organique, nécessitant un prélèvement sur au moins 30 cm de profondeur et une mesure de la densité apparente et de la pierrosité (ce qui n'est pas pratiqué en routine par les laboratoires d'analyses de terre).

La teneur en azote total est également une analyse couramment utilisée (méthode Kjeldahl, NF ISO 11261 ou méthode Dumas, NF ISO 13878). Elle sert à calculer le rapport C/N, premier indicateur de la qualité des matières organiques du sol. C'est également une donnée d'entrée des outils de calcul de dose prévisionnelle d'azote, afin d'estimer la minéralisation nette de l'azote organique du sol.

## II. Indicateurs des différents compartiments des matières organiques

En complément de la teneur ou du stock de carbone et d'azote organique du sol, il existe des indicateurs qui permettent d'aller plus loin dans la caractérisation de la qualité biologique d'un sol.

Le fractionnement granulométrique de la matière organique par tamisage sous eau (Feller, 1979) sépare la fraction fine (0-50  $\mu\text{m}$ , considérée comme la matière organique humifiée ou stable) des fractions grossières (50-2000  $\mu\text{m}$ , assimilée à la matière organique labile). La proportion de ces fractions s'avère être un indicateur assez robuste pour comparer, après 5 à 10 ans de pratiques, des itinéraires techniques qui diffèrent en termes de stockage/déstockage du carbone (Bouthier et al., 2007 ; Duval et al., 2016).

Les fonctions de minéralisation du carbone et de l'azote organique peuvent être approchées par des incubations aérobies en conditions contrôlées (28°C, humidité optimale) où sont mesurés le dégagement de CO<sub>2</sub> (minéralisation carbone, FD U44-163 et NF EN ISO 16072) et la variation de teneur en azote minéral (minéralisation azote, FD U44-163 et NF ISO 14238) (Alvarez et al., 1998).

La détermination des quantités de carbone présentes dans la biomasse microbienne par la méthode de fumigation au chloroforme (norme ISO 14.240-2, 1997) renseigne sur le compartiment vivant de la matière organique et apporte une information précoce sur l'évolution des stocks organiques, bien avant que cela ne soit détectable par une évolution du carbone total (Sparling, 1992).

Bien que ces méthodes de référence, robustes et pertinentes, soient proposées par certains laboratoires d'analyses de routine, leur productivité (mode de préparation, débit analytique, temps technicien nécessaire) reste limitée au regard des capacités de traitement des analyses de routine physico-chimiques (Tableau 1), ce qui limite leur accessibilité comme outils de diagnostic et de conseil.

Tableau 1 : Critères de productivité des indicateurs des différents pools de carbone et d'azote du sol

	Préparation	Délai mesure	Débit (/ j / ETP)*	Incertitude	Prix
<b>Carbone organique et azote total</b>	Sol séché broyé 200 µm	⌚	> 100	+/- 5 à 10 %	€
<b>Fractionnement granulométrique MO</b>	Sol séché tamisé 2 mm	⌚⌚	25 à 50	+/- 10 à 15 %	€€(€)
<b>Potentiels de minéralisation C et N</b>	Sol brut tamisé 5 mm	⌚⌚⌚⌚	< 25	+/- 10 à 15 %	€€€€
<b>Biomasse microbienne (fumigation)</b>	Sol brut tamisé 5 mm	⌚⌚	< 25	+/- 10 à 15 %	€€€

\* nombre d'échantillon traité par jour et par technicien

Dans ce contexte, des méthodes alternatives, supposées plus simples d'accès, ont été identifiées : le carbone labile par oxydation ménagée à froid au  $\text{KMnO}_4$  (Weil et al., 2003), l'azote minéralisable en incubation anaérobie sur 7 jours à 40°C (Azote Biologiquement Minéralisable, ABM) et la biomasse moléculaire totale (ADN microbien, Dequiedt et al., 2011).

### III. Objectifs et jeu de données

La pertinence de ces différentes méthodes a été testée sur 18 essais répartis sur 16 sites expérimentaux de moyenne et longue durées répartis sur l'ensemble du territoire français (Tableau 2). Ces essais impliquent différents systèmes de culture avec différentes pratiques de restitution organiques (PRO, résidus de culture, couverts végétaux de différents types).

Ces essais sont majoritairement disposés en blocs (sauf les essais de Kerguéhennec rotation et Rouffach qui sont en bandes), chaque modalité étant répétée sur 2 à 4 blocs. Afin de faciliter le traitement statistique des données, chaque modalité retenue de chaque essai a été échantillonnée avec 3 répétitions terrain (à partir des blocs et/ou d'échantillons composites). La base de données contient donc 3 mesures par modalité pour chaque indicateur, ce qui représente environ 200 échantillons.

Tableau 2 : Répertoire des essais mobilisés dans le cadre du projet CASDAR Microbioterre et les facteurs étudiés dans chacun des essais (CI : cultures intermédiaires, W sol : travail du sol, PRO : apport de produits résiduels organiques, SDC : système de culture / rotation)

Essais retenus dans le projet Microbioterre	Organismes	Sites	Facteurs étudiés		
Crécom	CRAB	Saint-Nicolas du Pélem (22)	PRO		SDC
EFELE	INRAE	Le Rheu (35)	PRO		
Jeu Les Bois	ARVALIS, OIER	Jeu Les Bois (22)	PRO		
Kerguéhennec travail du sol / rotation	CRAB	Bignan (56)	PRO	W sol	SDC
SOERE PRO	INRAE	Colmar (68)	PRO		
SOERE PRO	INRAE	Feucherolles (78)	PRO		
SOERE ACBB	INRAE	Mons (80)		W sol	SDC
Combe Poissonet	Dijon Céréales	Fromenteau (21)		W sol	CI
ELD En Crambade	ARVALIS, ACTA, Terres Inovia	Baziège (31)		W sol	CI SDC
Travail du sol / environnement	ARVALIS	Boigneville (91)		W sol	CI SDC
ECO Puissance 4	INRAE	Auzeville (31)			CI SDC
ECO Puissance 4	INP Purpan	Lamothe (31)			SDC
ECO Puissance 4	INRAE	Bretenière (21)			SDC
La Cage	INRAE	Versailles (78)			SDC
Rotaleg	CRAPL, CA49	Thornigné (49)			SDC
Rouffach	CRAGE, Lycée Agricole	Rouffach (68)			SDC

Ces sites expérimentaux sont mobilisés dans le cadre d'un projet en cours, le CASDAR Microbioterre (2016 - 2020), dont l'objectif final est d'améliorer la gestion des restitutions organiques dans les systèmes de grandes cultures et de polyculture élevage par un conseil agroécologique, basé sur une analyse de terre de routine complétée par un ou plusieurs indicateurs microbiologiques. Ce projet est piloté par ARVALIS, en partenariat avec AUREA AgroSciences, la Chambre d'agriculture de Bretagne, l'INRAE, l'Institut Polytechnique UniLaSalle, l'ITAB et Terres Inovia.

L'Azote Biologiquement Minéralisable (ABM) et la biomasse microbienne moléculaire ont été mesurés dans le cadre du projet AGRO-ECO SOL (2018 – 2021), porté par AUREA AgroSciences, en partenariat avec ARVALIS et l'INRAE (UMR Agroécologie, UMR EcoSys plateforme Biochem-Env, UMR Eco&Sols, US InfoSol). Ce projet porte sur l'industrialisation d'indicateurs de la fertilité biologique des sols, pour délivrer un conseil de gestion globale des sols agricoles. Les indicateurs présentés dans l'article sont communs aux deux projets.

Les pratiques de restitution organique étudiées dans ces essais sont supposées impacter le statut organique et biologique du sol, les indicateurs étudiés devraient donc permettre de mettre en avant des différences entre modalités. Les indicateurs biologiques et physicochimiques étudiés ont été comparés sur plusieurs aspects :

- leur capacité à discriminer les différentes modalités des essais étudiés (ANOVA 1 facteur sur l'ensemble des modalités de l'essai)
- la variabilité des données obtenue sur les 3 blocs de chaque modalité (coefficient de variation moyen entre les modalités d'un essai)
- la corrélation entre les résultats de la méthode de référence et la méthode alternative,
- leur niveau de productivité comparativement aux analyses de terre de routine (carbone organique et azote total).

#### **IV. Capacité à discriminer les modalités et variabilité**

##### ***a. Carbone organique et Azote total***

Sur les 18 essais valorisés, 4 essais (22%) présentent une différence significative entre modalités au seuil de 5 % (P-value < 0,05) sur la teneur en carbone organique, 5 essais (28 %) sur la teneur en azote total. L'hétérogénéité des caractéristiques du sol pouvant être importante, le seuil de significativité de 10 % peut également être utilisé. Le nombre d'essais atteint le nombre de 6 (33 %) au seuil de 10 % (P-value < 0,10) pour le carbone organique et l'azote total. Les modalités discriminées concernent majoritairement les apports de Produits Résiduels Organiques (PRO) (PROspective (Colmar), Crécom (Saint-Nicolas du Pélem), EFELE (Le Rheu), QualiAgro (Feucherolles)) et les essais les plus anciens (essai travail du sol de Boigneville, essai systèmes de culture de La Cage, Versailles). L'incertitude des laboratoires d'analyses de routine est d'environ +/- 5 à 10% pour les indicateurs de teneur totale en carbone et en azote. Cela explique qu'ils ne discriminent que des historiques très différenciés (durée et quantité de MO restituée).

Le coefficient de variation (CV) moyen entre blocs d'une même modalité permet d'évaluer la variabilité spatiale et analytique d'un indicateur. Il est de 9 % pour le carbone organique et 8 % pour l'azote total. Ces résultats sont notablement plus élevés que ceux observés par Bouthier et al., (2015) (entre 5 et 6 %) sur une douzaine de dispositifs expérimentaux du même type avec la même méthodologie d'échantillonnage et d'analyse. Le CV du carbone organique et de l'azote total est particulièrement élevé sur certains essais (> 15 % pour Jeu Les Bois, Boigneville Environnement et Bretenièrre), ce qui pourrait présenter une limite ou introduire un biais dans l'interprétation des résultats des autres indicateurs.

##### ***b. indicateurs liés au carbone***

Le carbone de la fraction 50-2000 µm (issu du fractionnement granulométrique) présente une différence significative entre modalités au seuil de 10 % (P-value < 0,10) dans 8 essais sur les 18 étudiés (44 %) (Tableau 3). En plus des essais portant sur les apports de PRO (PROspective (Colmar), Crécom (Saint-Nicolas du Pélem), QualiAgro (Feucherolles)), le carbone 50-2000 µm semble discriminer des modalités de travail du sol et de cultures intermédiaires (Kerguéhennec, Boigneville et Combe Poissonet).

Concernant le carbone oxydable au KMnO<sub>4</sub>, 10 essais (56 %) présentent une différence significative entre modalités au seuil de 10 % (P-value < 0,10). Ils regroupent l'ensemble des essais portant sur les apports de PRO (à l'exception de Jeu Les Bois), des essais sur le travail du sol et les

cultures intermédiaires (Kerguéhennec, ELD En Crambade (Baziège), Combe Poissonet (Fromenteau), SOERE ACBB (Mons)) ainsi que l'essai système de culture de La Cage à Versailles.

Tableau 3 : Proportion d'essais étudiés présentant une différence significative entre modalités et coefficient de variation (CV) moyen entre blocs d'une même modalité pour les indicateurs liés au carbone

	Carbone organique	C 50 -2000 µm	C miné 28 J	C KMnO <sub>4</sub>
<b>% essais avec ≠ significative entre les modalités à 5 %</b>	22 %	39 %	17 %	50 %
<b>% essais avec ≠ significative entre les modalités à 10 %</b>	33 %	44 %	22 %	56 %
<b>CV moyen (modalité x site) (%)</b>	9 %	11 %	20 %	8 %

Le carbone minéralisé 28 jours (incubation aérobie à 28°C et humidité optimale) ne montre une différence significative entre modalités au seuil de 10 % (P-value < 0,10) que dans 4 essais sur les 18 étudiés (22 %) (Tableau 3) : Crécom (Saint-Nicolas du Pélem), QualiAgro (Feucherolles), SOERE ACBB (Mons) et ECO Puissance 4 (Lamothe). La faible capacité de cette variable à discriminer les modalités est inhabituelle. En effet une précédente étude réalisée sur des dispositifs expérimentaux du même type a montré des effets statistiquement significatifs de l'apport de PRO, des cultures intermédiaires et du travail du sol (Valé et al., 2011). Les résultats de notre étude pourraient être expliqués par la grande variabilité observée entre blocs : CV = 20 %, soit le double du coefficient de variation obtenu pour les autres indicateurs liés au carbone (Tableau 3). Cette variabilité reste par ailleurs plus élevée que celle constatée par Bouthier et al., (2015) pour cet indicateur (entre 12 et 13 %) sur une douzaine des dispositifs expérimentaux du même type.

### c. indicateurs liés à l'azote

Sur les 18 essais valorisés, 9 essais (50%) présentent une différence significative entre modalités au seuil de 10 % (P-value < 0,10) sur l'azote de la fraction 50-2000 µm (issu du fractionnement granulométrique) (Tableau 4). Les essais concernés sont les mêmes que pour le carbone de la fraction 50-2000 µm, avec en plus l'essai ECO puissance 4 de Bretenièrre.

L'azote minéralisé en incubation anaérobie 7 jours à 40°C (ABM) n'a pas été mesuré sur les essais échantillonnés en 2017 (Crécom et Jeu Les Bois) ni sur l'essai EFELE. La mesure de cette variable a permis de mettre en évidence une différence significative entre modalités au seuil de 10 % (P-value < 0,10) dans 8 essais sur les 15 étudiés (53 %) : essais portant sur les PRO (PROspectice (Colmar), QualiAgro (Feucherolles)), essais systèmes de culture (Kerguéhennec (Bignan), ECO Puissance 4 (Lamothe), La Cage (Versailles)) et essais mixtes travail du sol / cultures intermédiaires (Boigneville, Combe Poissonet (Fromenteau)).

Tableau 4 : Proportion d'essais étudiés présentant une différence significative entre modalités et coefficient de variation (CV) moyen entre blocs d'une même modalité pour les indicateurs liés à l'azote

	Azote total	N 50 – 2000 µm	N miné 28 J	ABM
<b>% essais avec ≠ significative entre les modalités à 5 %</b>	28 %	39 %	28 %	47 %
<b>% essais avec ≠ significative entre les modalités à 10 %</b>	33 %	50 %	33 %	53 %
<b>CV moyen (modalité x site) (%)</b>	8 %	11 %	16 %	12 %

Comme pour le carbone, l'azote minéralisé 28 jours (incubation aérobie à 28°C et humidité optimale) montre une différence significative entre modalités au seuil de 10 % (P-value < 0,10) sur un nombre d'essais restreint par rapport à ce qui était attendu: 6 essais sur 18 (33 %, soit le même niveau de discrimination que l'azote total, Tableau 4). L'azote minéralisé 28 jours est le seul indicateur à ne pas discriminer les modalités apport de PRO de QualiAgro (Feucherolles), par contre il est le seul à discriminer les modalités cultures intermédiaires et système de culture de l'essai ECO puissance 4 d'Auzeville. Les autres modalités discriminées portent sur les PRO (Crécom), les systèmes de culture (ECO Puissance 4 (Lamothe), La Cage (Versailles)) et essais mixtes travail du sol / cultures intermédiaires (Kerguéhennec (Bignan), Combe Poissonet (Fromenteau)). Cette variable a présenté

une variabilité entre blocs plus importante que celle observée pour les autres indicateurs (Tableau 4), ce qui pourrait expliquer la faible capacité à discriminer les modalités.

#### d. Biomasse microbienne

La biomasse microbienne par fumigation / extraction montre une différence significative entre modalités au seuil de 10 % (P-value < 0,10) dans 10 essais sur les 18 étudiés (56 %) (Tableau 5). Cet indicateur s'avère particulièrement pertinent pour discriminer les modalités systèmes de culture / rotation : ECO puissance 4 (Bretenière, Lamothe) Kerguéhennec (Bignan), Rotaleg (Thorigné), Rouffach, La Cage (Versailles).

La biomasse microbienne moléculaire (BMM, extraction d'ADN brut dans un lysat d'1 g de sol sec puis quantification après migration sur gel d'agarose) discrimine le même nombre d'essais au seuil de 10 % (P-value < 0,10), mais deux fois moins au seuil de 5 % (P-value < 0,05). Ce résultat pourrait être expliqué par la forte variabilité observée entre blocs : CV = 19 % (Tableau 5), ce qui suggère une maîtrise méthodologique à améliorer. Comme pour la méthode fumigation / extraction, la méthode moléculaire semble discriminer les modalités systèmes de culture / rotation (ECO puissance 4 (Bretenière, Lamothe), Rotaleg (Thorigné), La Cage (Versailles)), mais également les modalités apport de PRO (Crécom (Saint-Nicolas du Pélem), EFELE (Le Rheu), QualiAgro (Feucherolles) et Jeu Les Bois (c'est le seul indicateur à répondre significativement sur ce site)).

Tableau 5 : Proportion d'essais étudiés présentant une différence significative entre modalités et coefficient de variation (CV) moyen entre blocs d'une même modalité pour les indicateurs de biomasse microbienne

	Carbone organique	Fumigation / extraction	Quantification ADN total
% essais avec ≠ significative entre les modalités à 5 %	22 %	50 %	28 %
% essais avec ≠ significative entre les modalités à 10 %	33 %	56 %	56 %
CV moyen (modalité x site) (%)	9 %	12 %	19 %

#### V. Corrélation entre méthodes

Afin d'évaluer le potentiel des indicateurs tels que la biomasse microbienne moléculaire (BMM) (évaluée par extraction et quantification d'ADN total), le carbone oxydable au  $\text{KMnO}_4$  (MOL-Ox) et l'azote minéralisable évaluée par incubation anaérobie sur 7 jours à 40°C (AMB) comme des alternatives aux méthodes de référence (biomasse microbienne par fumigation / extraction, fractionnement granulométrique, potentiels de minéralisation en incubation aérobie 28 jours à 28 °C et humidité optimale), une comparaison 2 à 2 des résultats obtenus pour chaque indicateur avec chaque méthode a été réalisée pour les 18 essais étudiés. L'analyse statistique ne montre aucune corrélation significative, à l'exception des 2 méthodes de mesure de la biomasse microbienne (Tableau 6 et Figure 1), confirmant la forte corrélation déjà rapportée dans littérature (Marstrop et al., 2000 ; Laval et al., 2009).

Tableau 6 : Coefficients de corrélation ( $R^2$ ) entre les résultats des méthodes dites de référence et des méthodes alternatives sur l'ensemble des essais étudiés

méthode de référence	méthode alternative	$R^2$
Biomasse microbienne fumigation / extraction (BMI)	extraction d'ADN microbien (BMM)	<b>0,62</b>
C fraction 50 – 2000 $\mu\text{m}$	Carbone oxydable au $\text{KMnO}_4$ (MOL-Ox)	< 0,01
C minéralisé 28 J		0,07
N fraction 50 – 2000 $\mu\text{m}$	incubation anaérobie 7 jours 40°C (ABM)	< 0,01
N minéralisé 28 J		0,23

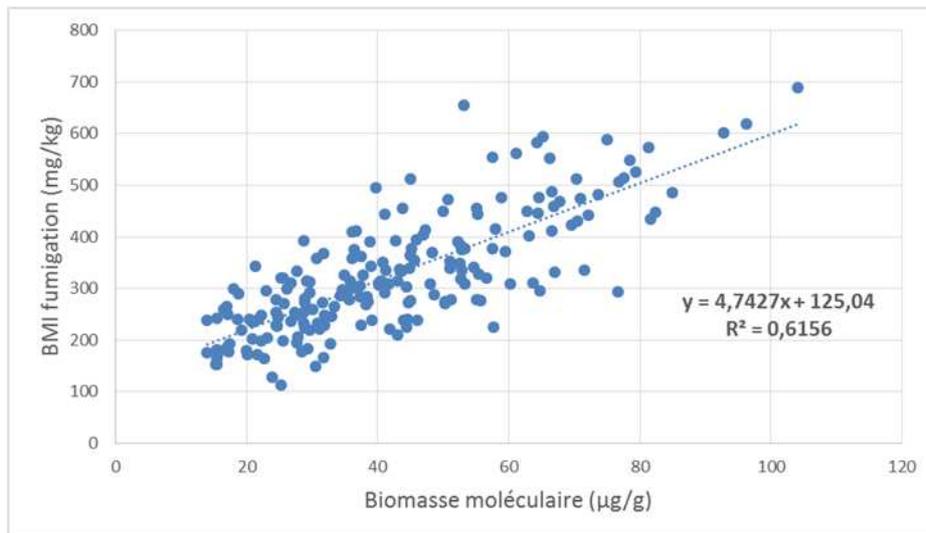


Figure 1 : Relation entre les résultats de biomasse microbienne par méthode moléculaire et par fumigation / extraction sur les 18 essais étudiés

## VI. Synthèse et perspectives

Cette première analyse du jeu de données du projet *Microbioterre* confirme la pertinence des indicateurs de biomasse microbienne totale par les méthodes de fumigation / extraction (BMI) et par extraction d'ADN total (BMM), du fractionnement granulométrique de la MO (FGR), du carbone oxydable au  $\text{KMnO}_4$  (MOL-Ox) et de l'azote minéralisé en incubation anaérobie 7 jours à 40°C (ABM) pour discriminer les pratiques culturales étudiées (indicateurs classés par nombre décroissant d'essais avec différence significative entre modalités au seuil de 10 %) :

- apports de PRO (MOL-Ox, BMM, FGR, ABM, BMI)
- modalités de travail du sol (FGR, MOL-Ox)
- présence de cultures intermédiaires (FGR, ABM)
- rotations et systèmes de culture (BMI, BMM, AMB)

Les potentiels de minéralisation C et N en incubation aérobie 28 jours à 28°C et humidité optimale (C et N minéralisé 28 J) sont moins discriminants, sans doute à cause d'une sensibilité plus forte à la variabilité entre blocs.

Cette variabilité moyenne pour l'ensemble des indicateurs est plus forte sur certains essais (Jeu les Bois, Boigneville Environnement, Auzeville, Bretenière, Rouffach, Thorigné), et semble être corrélée négativement avec la proportion d'indicateurs discriminant significativement les modalités au seuil de 10 % (Figure 2). Ainsi les essais présentant le moins de variabilité entre les blocs d'une même modalité sont ceux où la proportion d'indicateurs discriminants est la plus élevée. Il semble donc indispensable de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale pour la suite du traitement des données.

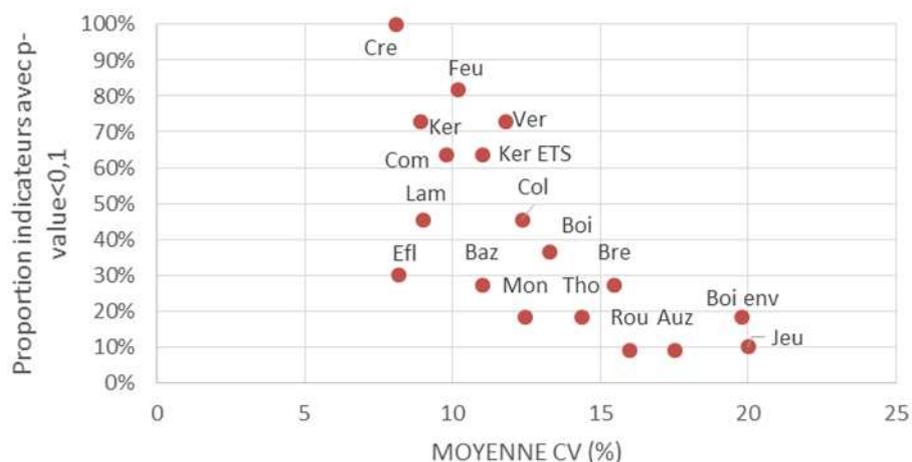


Figure 2 : Relation entre le coefficient de variation entre blocs (CV) moyen pour l'ensemble des indicateurs d'un même site et la proportion d'indicateurs montrant une différence significative en modalités au seuil de 10 %

A l'exception de la biomasse microbienne, les résultats obtenus avec les méthodes alternatives testées (MOL-Ox, ABM, BMM) ne présentent pas de corrélation avec ceux obtenus avec les méthodes de référence (BMI, FGR, C et N minéralisé 28 J). Cependant les résultats obtenus avec les méthodes alternatives montrent une capacité de discrimination égale voire supérieure que les méthodes de référence sur le jeu de données étudié, ce qui rend ces méthodes potentiellement pertinentes pour du conseil opérationnel pour la gestion des restitutions organiques dans les systèmes de grandes cultures et de polyculture élevage.

Tableau 7 : Critères de productivité et capacité à discriminer les modalités des essais étudiés (%essais P < 0,1) des méthodes « alternatives » testées (Carbone oxydable au KMnO<sub>4</sub>, azote minéralisé en incubation anaérobie 7 jours à 40°C (ABM), biomasse microbienne moléculaire (BMM))

	Préparation	Délai mesure	Débit (/ j / ETP)*	% essais P < 0,1	Prix
<b>Carbone KMnO<sub>4</sub></b>	Sol séché broyé 200 µm	? (⌚)	? (> 100)	56 %	? (€)
<b>ABM</b>	Sol brut tamisé 5 mm	? (⌚⌚)	? (≈ 50)	53 %	? (€€)
<b>BMM</b>	Sol « séché » tamisé 2 mm	? (⌚⌚⌚)	? (25 à 50)	56 %	? (€€€)

\* nombre d'échantillons traités par jour et par technicien

Le gain de productivité permis par les méthodes alternatives est modéré pour la biomasse microbienne moléculaire (des ajustements méthodologiques sont nécessaires), significatif pour l'azote minéralisé en incubation anaérobie 7 jours à 40°C (ABM), et très significatif pour le carbone oxydable au KMnO<sub>4</sub> (MOL-Ox) (Tableau 7 comparé au Tableau 1).

Ces premières conclusions doivent être consolidées par une analyse statistique plus fine des données (sensibilité aux conditions pédoclimatiques, modélisation statistique, confrontation de ces variables aux données agronomiques, hétérogénéité spatiale des sols des sites expérimentaux) et l'acquisition de nouvelles références, afin de proposer *in fine* le meilleur compromis analytique.

## Bibliographie

- Alvarez G., Chaussod R., Loiseau P. et Delpy R. 1998. Soil indicators of C and N transformations under pure and mixed grass-clover swards, *European Journal of Agronomy*, 9, 157-172
- Bouthier A., Trochard R., Morvan T. 2007. Effets d'apports répétés de fumiers stockés et compostés sur le statut organique du sol, 8ème rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre (GEMAS COMIFER, Blois, 20-21 novembre 2007)
- Bouthier A., Trochard R., Valé M., Chaussod R., Nouaïm R. 2015. Valoriser les indicateurs microbiologiques en grandes cultures et polyculture élevage, 12ème rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre (GEMAS COMIFER, Lyon, 18-19 novembre 2015)
- Clivot H., Mouny J.-C., Duparque A., Dinh J.-L., Denoroy P., Houot S., Vertes F., Trochard R., Bouthier A., Sagot S., Mary B. 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling and Software*, Elsevier, 2019, 118, pp.99-113.
- Dequiedt S, NPA Saby, M Lelievre, C Jolivet, J Thioulouse, B. Toutain, D Arrouays, A Bispo, P Lemanceau, and L Ranjard. 2011. Biogeographical Patterns of Soil Molecular Microbial Biomass as Influenced by Soil Characteristics and Management. *Global Ecology and Biogeography*. 20: 641-652
- Duval M.E., Galantini J.A., Martínez J.M., López F.M., Wall L.G., 2016. Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality. *Soil & Tillage Research*. 159, 9–22.
- Feller C., 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols, Application aux sols tropicaux à texture grossière très pauvre en humus, cahier ORSTOM, série Pédologique XVII, 339–346
- Laval K., Mougou C, Akpa M., Barray S., Dur J.-C., Gangneux C., Lebrun C., Legras M., Lepelletier P., Plassart P., Taïbi S., Trinsoutrit-Gattin I., 2009. Nouvelles avancées vers la compréhension des données biologiques, *Étude et Gestion des Sols*, Volume 16, 3/4, – pages 275 à 287.
- Marstrop H., Guan X., Gong P., 2000. Relationship between dsDNA, chloroform labile C and ergosterol in soils of different organic matter contents and pH, *Soil Biology & biochemistry* 32, 879-882
- Sparling G.P., 1992. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*, 30, pp 192-207.

- Valé M., Bouthier A., Trochard R., Chaussod R., Nouaïm-Chaussod R. 2011. Pertinence de nouveaux indicateurs pour évaluer l'impact des pratiques culturales sur le fonctionnement biologique des sols, 10ème rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre (GEMAS COMIFER, Reims, 23-24 novembre 2011)
- Weil R.R., Islam K.R., Stine M.A., 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, pp 3-17.

## **Remerciements**

Le projet Microbioterre est lauréat de l'appel à projet CASDAR Recherche Technologique 2016.

Le projet AGRO-ECO SOL est accompagné par l'ADEME dans le cadre du programme Industrie et Agriculture éco-efficientes du programme des Investissements d'Avenir.

Ces deux projets ont été labellisés par le RMT Fertilisation & Environnement.