

## VALORISER LES INDICATEURS MICROBIOLOGIQUES EN GRANDES CULTURES ET EN POLYCLTURE-ELEVAGE

A BOUTHIER <sup>(1\*)</sup>, R TROCHARD <sup>(2)</sup>, M VALE <sup>(3)</sup>, R CHAUSSOD <sup>(4)</sup> R NOUAÏM <sup>(4)</sup>

<sup>(1\*)</sup> ARVALIS-Institut du végétal Domaine expérimental du Magneraud 17700 SAINT PIERRE D'AMILLY – France

<sup>(2)</sup> ARVALIS-Institut du végétal Station expérimentale de La Jaillière 44370 LA CHAPELLE SAINT SAUVEUR – France

<sup>(3)</sup> AUREA Agrosociences – 270 avenue de la Pomme de Pin – 45160 ARDON

<sup>(4)</sup> SEMSE (Service et Etudes en Microbiologie des Sols et de l'Environnement) - 2 chemin du lavoir - 21310 VIEVIGNE - France

\* Orateur et correspondant : [a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr](mailto:a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr)

### Introduction

Le champ d'application de l'analyse de terre courante se limite aujourd'hui à la gestion de la fertilisation minérale, des apports d'amendements minéraux basiques en vue du maintien ou de l'amélioration des propriétés chimiques du sol. Il concerne peu la gestion d'autres pratiques culturales ayant un impact important sur la qualité du sol telles que l'apport d'amendements et de fertilisants organiques, la mise en place de couverts végétaux en interculture ou associés aux cultures principales, ou encore le travail du sol.

La qualité du sol peut être définie comme l'aptitude de ce dernier à remplir certaines fonctions vis-à-vis de la production ou de l'environnement, dans un écosystème donné (Chaussod, 1996). Une gestion durable des systèmes de culture du point de vue de la préservation de la qualité des sols, doit aussi garantir que les fonctions biologiques soient favorisées. Quatre grandes fonctions biologiques contribuent à la qualité du sol agricole : (1) la transformation du carbone organique, (2) le recyclage des nutriments principalement l'azote et le soufre (dont les dynamiques dans le sol sont liées à celle du carbone organique) et le phosphore (cycle ouvert), (3) le maintien de la structure et (4) la régulation des bioagresseurs. Les microorganismes du sol participent à toutes ces fonctions et sont des maillons essentiels des deux premières.

L'intégration de paramètres microbiologiques dans l'analyse de terre courante, pour en faire des bioindicateurs en vue d'étendre son champ d'application, nécessite que des travaux soient conduits pour identifier les paramètres les plus pertinents vis-à-vis des fonctions identifiées, que ces paramètres soient mesurables à un coût abordable et que les résultats des mesures soient facilement interprétables (aide à la décision). La notion de bioindicateur fait ici référence à un paramètre biologique (simple ou composé) renseignant sur l'état et le fonctionnement biologique d'un sol et pouvant aider à la gestion de pratiques culturales favorables à la qualité du sol.

ARVALIS Institut du Végétal, en partenariat avec AUREA Agrosociences et le SEMSE a initié en 2009 une étude visant à évaluer la pertinence et contribuer au référencement de bioindicateurs issus des travaux de recherche nationaux et internationaux et qui peuvent aujourd'hui être mesurés en routine par les laboratoires d'analyse.

On a ainsi cherché à évaluer dans les systèmes de grande culture et polyculture-élevage, les réponses à des pratiques culturales de plusieurs bioindicateurs identifiés a priori comme pertinents par Rémi Chaussod spécialiste INRA de microbiologie des sols (Chaussod et al., 2001 ; Bouthier et al., 2014), en s'appuyant sur des dispositifs expérimentaux de moyenne et de longue durée et des parcelles agricoles bien renseignées en termes d'historique et de caractérisation du contexte pédologique et climatique.

L'objectif de cette étude était d'acquérir des données « de référence » sur des dispositifs bien connus au plan agronomique et balayant un large éventail de situations, et en particulier

d'évaluer les modifications induites par diverses pratiques culturales (fertilisation organique vs minérale, travail du sol, CIPAN...) sur les pools labiles de la matière organique, avec une double préoccupation : stockage et déstockage de carbone d'une part, pouvoir alimentaire du sol en azote d'autre part. On a cherché en particulier à voir si des paramètres biologiques facilement mesurables pourraient être des indicateurs d'une évolution des stocks de C et N plus précoces et plus sensibles que le simple dosage de C et N organiques.

Cette étude constitue une première étape d'un travail qui a pour objectif à terme, d'améliorer le diagnostic de qualité du sol à l'échelle parcellaire. Nous nous limiterons ici aux indicateurs de fonctions de transformation du carbone et de recyclage de l'azote ; les aspects concernant la « biodiversité » sont abordés dans la communication de Nouaïm et Chaussod à ce même colloque.

Ces bioindicateurs ont été étudiés entre 2010 et 2015, sur différents dispositifs expérimentaux, conduits sur des thématiques variées. Les indicateurs retenus et les tous premiers résultats de ces travaux ont fait l'objet d'une présentation (M. Valé et al.) au colloque COMIFER-GEMAS de Reims en 2011.

Cette présentation fait le bilan de l'ensemble des avancées de cette étude et propose des recommandations méthodologiques pour la poursuite des travaux de référencement.

La présentation porte sur la synthèse de l'ensemble des mesures réalisées et s'attache à en dégager des conclusions opérationnelles sur les points suivants :

- Variabilité spatiale et temporelle associée aux mesures des différents bioindicateurs et précautions à prendre en termes de prélèvement et d'échantillonnage pour garantir une fiabilité de mesure acceptable.
- Réponse des bioindicateurs aux différents facteurs étudiés dans les essais analytiques.
- Utilisation des indicateurs pour évaluer différents types de systèmes de culture sur les deux fonctions retenues.

## 1) Matériel et méthodes

Quatre types de paramètres microbiologiques ont ainsi été retenus pour caractériser l'abondance, l'activité et la diversité microbienne du sol (tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des bioindicateurs retenus dans le projet.

Information recherchée	Type d'indicateur
Abondance microbienne	Biomasse microbienne (BMI) par fumigation (d'après NF ISO 14240-2)
Activité microbienne	Potentiels de minéralisation C (NF EN ISO 16072) et N (XP U44-163 et NF ISO 14238) par incubation de 28 jours (CMIN28j et NMIN28j)
	Activité enzymatique FDA hydrolase (FDA)
Diversité microbienne	Aptitudes métaboliques ou biodiversité fonctionnelle (BIODIF). Calcul de 2 indicateurs : l'activité métabolique moyenne (ACWD) et l'indice de biodiversité fonctionnelle (IBF)
Caractérisation de la matière organique du sol	Fractionnement granulométrique de la MO (d'après la NF X31-516) en 3 classes 0-50 µ (FGMO 0-50), 50-200 µ (FGMO 50-200), 200-2000 µ (FGMO 200-2000)
	Matière organique labile M.O.L. (extraction de C ou N labile par autoclavage)

Deux indicateurs de caractérisation du carbone organique et de l'azote total du sol ont été également inclus dans cette étude : le fractionnement granulométrique de la matière organique et les métabolites microbiens (ou matières organiques labiles) carbonés (C-MOL) ou azotés (N-MOL) par autoclavage. Pour simplifier, nous les avons appelés bioindicateurs bien qu'ils ne mesurent pas directement des paramètres biologiques. Les bioindicateurs retenus ont été mesurés ainsi que la teneur en carbone organique (Corg.) et azote total (Ntot.), dans deux grands types de dispositifs expérimentaux (essais analytiques et essais systèmes), et sur un réseau de parcelles agricoles en semis direct sous couvert végétal (SCV). L'ensemble des situations étudiées a fait l'objet d'une caractérisation physico-chimique complète de l'horizon 0-25 cm.

➤ Les dispositifs expérimentaux de type analytique concernent 3 thématiques :

- Apport d'effluents d'élevages sur les essais de La Jaillière (44), du Rheu (35) et de Jeu les Bois (36). Ces essais mis en place entre 1995 et 1999 par ARVALIS seul ou en partenariat (avec 4 chambres d'Agriculture sur l'essai de Jeu les Bois), ont consisté à apporter tous les ans pendant huit à dix ans différents effluents d'élevages : des fumiers bruts ou compostés de bovins, de porcins et de volailles et lisiers de porcs. Le but était de mieux quantifier les effets directs « azote » de ces apports, ainsi que leurs effets à long terme en lien avec les modifications du statut organique du sol. Les essais étaient conduits en rotation maïs fourrage-blé (La Jaillière), monoculture de maïs (Le Rheu), rotation colza-blé (Jeu les Bois) et prairie temporaire de longue durée (La Jaillière et Jeu les bois). Les prélèvements de terre dans la couche arable (0-25 cm) ont été effectués au cours des printemps 2008, 2009 ou 2010 selon les essais, sur sol nu avant culture de printemps ou sous du blé, et dans tous les cas après un délai de 1 à 4 ans depuis le dernier apport d'effluents d'élevage pour s'affranchir des effets court terme de ce dernier apport.

- Implantation de couverts en période d'interculture sur l'essai environnement de Boigneville (91) suivi par ARVALIS, de Thibie (51) suivi par l'AREP et de Kerlavic (29) suivi par la CRAB. Ces essais mis en place entre 1991 et 1994, ont comparé pendant 16 à 19 ans un couvert végétal (moutarde ou ray-grass) implanté au cours de la période d'interculture tous les ans ou tous les deux ans. Les prélèvements y ont été effectués lors des printemps 2010 ou 2011 sur la couche labourée (0-25 cm) au moins 3 mois après la destruction du couvert précédent. Des prélèvements ont également été réalisés au printemps 2014 sur un essai « espèces de couverts » conduit par Arvalis sur le site de Boigneville (dont les résultats font l'objet de la présentation de J.Labreuche et al.) et au printemps 2015 sur l'essai de Thibie.

- Travail du sol sur l'essai travail du sol de Boigneville, deux modalités avec ou sans labour de l'essai système de St Exupéry(69) et sur l'essai environnement de Boigneville (91). Dans ce dernier, les deux modalités de travail du sol (labour et en semis direct) sont croisées avec deux modes de gestion de la période d'interculture: implantation de couverts de crucifères et sol nu. Les prélèvements ont été réalisés lors des printemps 2010 ou 2011. Deux horizons (0-10 cm et 10-20 cm) ont été échantillonnés dans les modalités en non labour.

➤ Deux dispositifs expérimentaux mettant en œuvre ou comparant des systèmes de culture ont aussi fait l'objet de mesures de bioindicateurs.

Le dispositif des fermes de Boigneville où sont mis en œuvre 5 systèmes de culture (raisonné, intégré, monoculture de blé en non labour depuis 1989, agriculture biologique depuis 2008 et agriculture de conservation (SCV) depuis 2010), où tous les résidus de culture sont restitués, a fait l'objet de 3 à 5 prélèvements entre l'automne 2013 et le printemps 2015. Une des finalités de cette série de prélèvements au cours du temps était d'évaluer la variabilité temporelle des indicateurs.

Sur l'essai de St Exupéry, en monoculture de maïs grain irrigué, 2 modalités correspondant à deux niveaux d'intensification différents depuis 2003, ont été échantillonnées au printemps 2011.

➤ Enfin un réseau de 22 parcelles agricoles conduites SCV depuis 2 à 20 ans et réparties sur l'ensemble du territoire français, a été échantillonné au printemps 2013, pour évaluer l'état physicochimique et biologique du sol, au démarrage d'un suivi agronomique de ces parcelles. Dans quelques parcelles des prélèvements ont été réalisés sur des bandes ou parcelles contiguës, différenciées au niveau de l'ancienneté du système d'agriculture de conservation, afin d'évaluer l'effet de cette ancienneté sur les paramètres chimiques et microbiologiques. Comme dans les modalités en non labour des essais travail du sol, le prélèvement a été réalisé sur les horizons 0-10 cm et 10-20 cm.

## 2) Résultats

### 2.1) Variabilité spatiale et temporelle associée aux mesures des différents bioindicateurs.

L'intégration des bioindicateurs dans l'analyse de terre courante ne sera possible que si les conditions de prélèvement (période et procédure d'échantillonnage) et de conservation des échantillons de terre requises pour assurer une fiabilité acceptable des analyses, ne compliquent pas trop les procédures utilisées pour l'analyse physico chimique classique. Plusieurs questions se posent :

- 1/ La variabilité spatiale des bioindicateurs en lien avec le sol et les pratiques culturales est-elle plus importante que celle des paramètres plus couramment mesurés comme le carbone organique (Corg.) et l'azote total (Ntot.) ? En effet, vu la sensibilité des indicateurs biologiques à différents facteurs, leur variabilité spatiale doit être évaluée par rapport à celle de paramètres classiques (comme Ct et Nt) pour savoir si les pratiques d'échantillonnage classiques sont utilisables ou si elles doivent être adaptées.
- 2/ Quelle est la variabilité temporelle des bioindicateurs en lien avec l'occupation du sol (sol nu ou présence d'un couvert végétal ou d'une culture) et le climat qui va jouer notamment sur la température et la teneur en eau du sol ? Les organismes vivants du sol sont sensibles aux conditions pédoclimatiques (température, humidité, aération...) et aux entrées de matière organique (ressource trophique sur laquelle ils se développent). Dans la mesure où ce sont les effets des pratiques agronomiques qui nous intéressent, il convient donc de rechercher si des effets de très court terme (fluctuations saisonnières) ne risquent pas de perturber la mesure des indicateurs retenus, ou bien de préciser à quelles dates ou dans quelles conditions prélever les échantillons de sol pour que la mesure soit fiable et utilisable.

Pour apporter des éléments de réponse à la première question, on a comparé la variabilité des paramètres mesurés appréciée par le coefficient de variation, à celle des teneurs en Corg. et Ntot. sur des dispositifs ayant fait l'objet d'analyses sur plusieurs blocs d'une même modalité d'essai ou sur plusieurs stations de parcelles agricoles (figure 1). Les résultats de ces comparaisons montrent que la variabilité spatiale diffère selon les bioindicateurs. Elle est inférieure ou du même ordre de grandeur que celle du Corg. et du Ntot. pour la fraction fine (0-50  $\mu$ ) du Corg. et du Ntot. ainsi que pour C-MOL, et supérieure pour BMI, FDA, CMIN28j, NMIN28j et AWCD.

Les résultats issus d'analyses réalisées au printemps 2015 (figure 2), en vue de l'implantation de 3 essais de longue durée mis en place par TERRES INOVIA à Mons(02) et Le Subdray (36) et par ARVALIS à Montardon (64) suggèrent que la variabilité spatiale d'un même paramètre microbiologique diffère entre sites sans lien exclusif avec celle de la teneur en Corg. et N tot suggérant d'autres facteurs de variation, soit chimiques (ex. : pH) soit physiques (ex. : tassement). Ainsi, sur le site de Mons, le plus homogène au niveau des sols et de la teneur en Corg., les paramètres BMI et C MIN28j montrent la plus forte variabilité, probablement en lien avec un état structural du sol hétérogène avec coexistence de zones plus compactées qui peuvent être défavorables vis-à-vis de ces deux paramètres. La variabilité de ces paramètres en lien avec l'état structural du sol avait été mise en évidence par Vian et al. (2009).

Figure 1 : Valeur médiane du coefficient de variation (CV) de différents paramètres chimiques et microbiologiques calculés à partir d'analyses réalisées dans les parcelles élémentaires de modalités d'essais en dispositif blocs randomisés à 3 ou 4 répétitions.

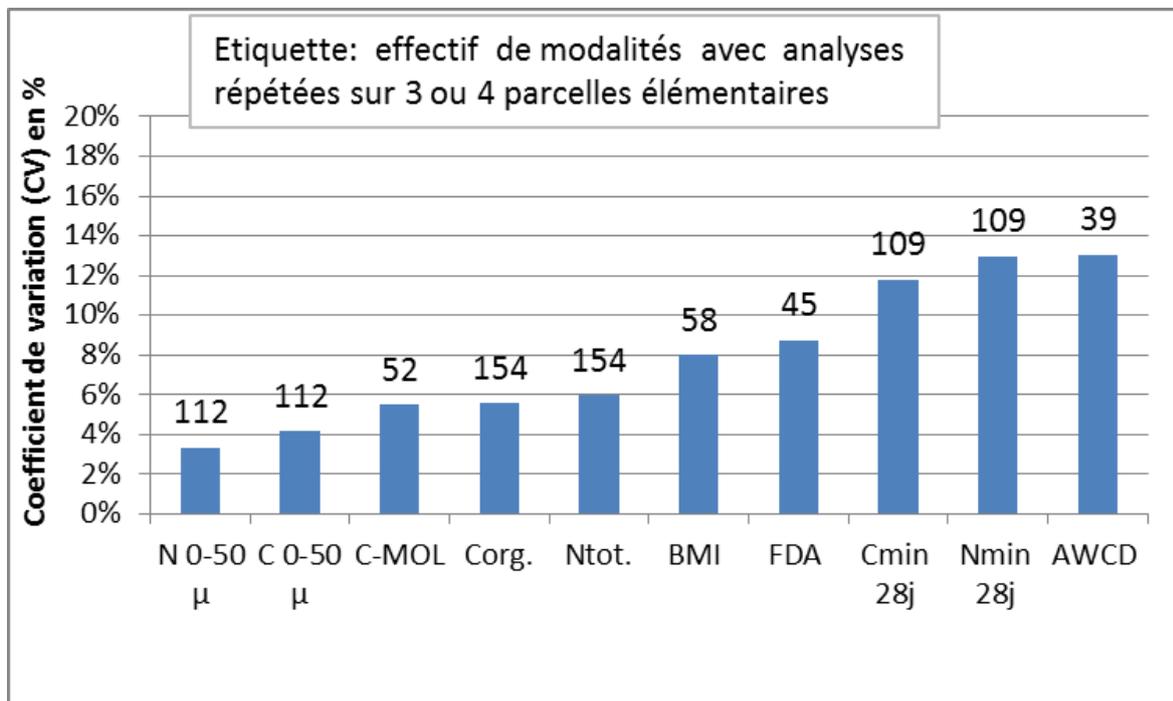
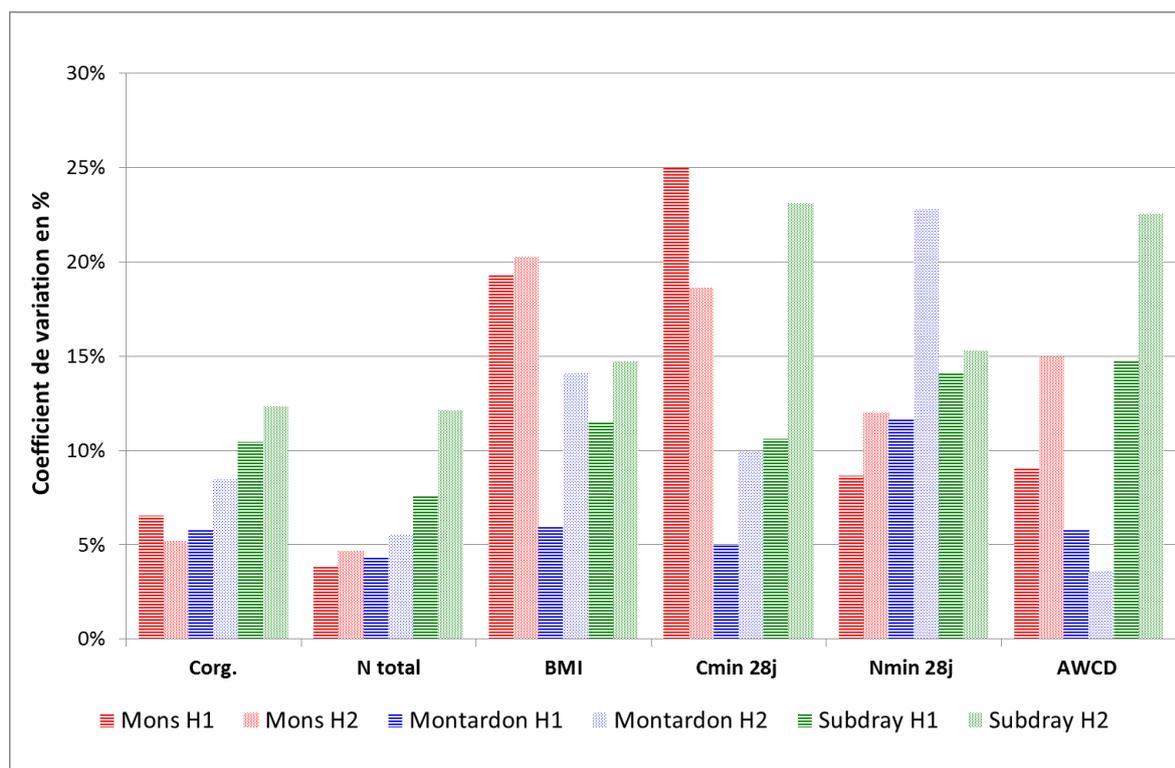


Figure 2 : Variabilité spatiale des différents paramètres chimiques et biologiques appréciée par le coefficient de variation de 6 analyses réalisées sur 2 horizons au sein de 3 parcelles agricoles d'une dizaine d'hectares.

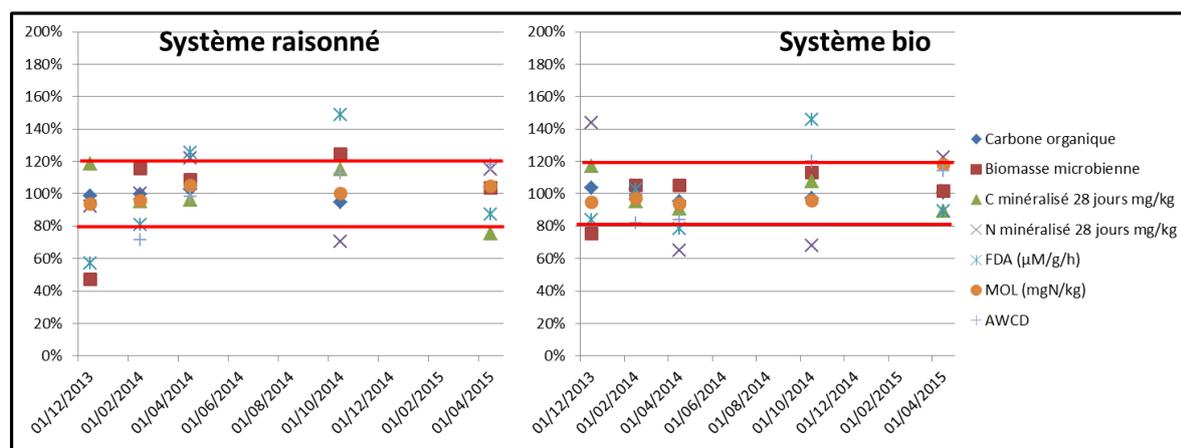


L'estimation de la variabilité temporelle doit être regardée en priorité sur les bioindicateurs à priori plus sensibles à l'occupation du sol et au climat, tels que BMI, FDA, CMIN28j, NMIN28j, AWCD.

Les résultats de la littérature et les quelques suivis temporels déjà réalisés suggèrent de privilégier les prélèvements au printemps ou en automne après réhumectation du sol, sous culture installée ou sous sol nu, en évitant de prélever dans les 2 mois qui suivent l'enfouissement de résidus de culture ou de produit organique.

Un suivi de plusieurs paramètres microbiologiques sur des parcelles du dispositif des fermes de Boigneville à 5 dates de mesure entre octobre 2013 et avril 2015 (sous blé en décembre 2013, février et avril 2014, sous couvert végétal en octobre 2014 puis sous orge de printemps ou lin en avril 2015), a été réalisé en vue d'évaluer la variabilité temporelle de ces paramètres dans des conditions de prélèvement conformes aux recommandations. Les résultats montrent que la variabilité temporelle des paramètres microbiologiques est certes plus importante que celle de Corg. (ce qui est tout à fait normal compte tenu de la sensibilité des paramètres biologiques aux facteurs de l'environnement), mais reste contenue dans une gamme de plus ou moins 20 % autour de la valeur moyenne des 5 dates de prélèvement (figure 3). Les variabilités les plus importantes sont observées pour NMIN28j, FDA et AWCD alors que CMIN28j, BMI et N-MOL montrent une relative stabilité.

Figure 3 : Evolution des valeurs de quelques paramètres chimiques et microbiologiques exprimées en % de la moyenne, au cours de 5 prélèvements réalisés entre novembre 2013 et avril 2015 sur 2 parcelles des fermes de Boigneville.



## 2.2) « Réponse » des bioindicateurs aux différents facteurs étudiés dans les essais analytiques

### 8 à 10 ans d'historique d'apports répétés de produits résiduaux organiques (pro) issus d'élevages :

Sur les 3 essais, les apports répétés d'effluents d'élevages pendant 8 à 10 ans ont conduit à une différenciation significative de la teneur en Corg. et Ntot. par rapport à la modalité recevant une fertilisation minérale, seulement pour des apports annuels de fumiers bruts ou compostés supérieurs à 10 t/ha de produit brut. Ces écarts restent faibles (compris entre 0,1 et 0,2 % Corg.) sur la couche labourée alors que les mesures au champ de minéralisation d'azote réalisées en fin d'essai, montrent des écarts de minéralisation par rapport à la modalité en fumure minérale, de +20 à +100% (figure 4). La plupart des bioindicateurs mesurés montrent aussi des écarts, exprimés en % du témoin, du même ordre de grandeur que ceux de la teneur en Corg., à l'exception de FGMO 50- 2000 (figure 5). De plus la relation entre ces variables et la vitesse de minéralisation d'azote au champ semble moins dépendante du type de sol que les autres bioindicateurs.

Dans les 3 essais, plusieurs types d'effluents d'élevages apportés à des doses d'azote total voisines, ont des effets proches sur la teneur en Corg et peuvent être comparés quant à leurs effets sur les bioindicateurs. Sur les essais de La Jaillière et du Rheu, les fumiers de bovins bruts et compostés ainsi que des fumiers de porcs bruts et compostés ne se sont pas différenciés tant sur la minéralisation d'azote que sur les bioindicateurs, ce qui n'est pas le cas de l'essai de Jeu les Bois. Sur cet essai, le compostage du fumier de bovins conduit à une plus faible vitesse de minéralisation (0,49 et 0,6 kg N/ha/Jour normalisé respectivement pour le fumier composté et brut) et une diminution du C et N dans les fractions plus grossières (figure 6). Cet effet compostage sur la stabilité du carbone et de l'azote stockés dans le sol, ne se retrouve pas sur les deux autres essais. Les analyses chimiques et biochimiques des effluents réalisées sur les essais de La Jaillière et de Jeu les bois,

montrent des compositions assez proches des fumiers de bovins qui ne permettaient pas de prévoir les effets observés.

Dans ces 3 essais, les bioindicateurs mesurés sur un prélèvement réalisé au moins 18 mois après le dernier apport organique, reflètent principalement les effets long terme des 8 à 10 ans d'apports (Bouthier et al., 2014). Dans ce cas ce sont les fractions granulométriques grossières du carbone et de l'azote qui montrent une bonne aptitude à rendre compte de ces effets long terme à la fois en termes de quantités apportées et de type de produits (compostage). La relative indépendance du type de sol mérite d'être confirmée, car elle pourrait simplifier le référencement de cet indicateur.

Figure 4 : Relation entre la vitesse de minéralisation d'azote au champ (en kg N/ha et par jour normalisé) et la teneur en Corg. et Ntot., mesurés en fin d'essai sur les 3 essais pro de longue durée.

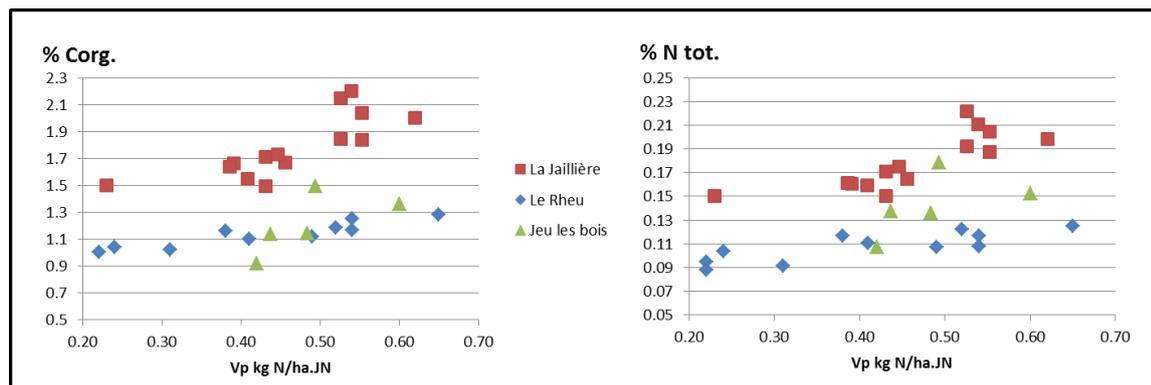


Figure 5 : Relation entre la vitesse de minéralisation d'azote au champ et la proportion (%) de Corg. et Ntot. dans la fraction 50-2000  $\mu$ , mesurés en fin d'essai sur les 3 essais effluents d'élevages.

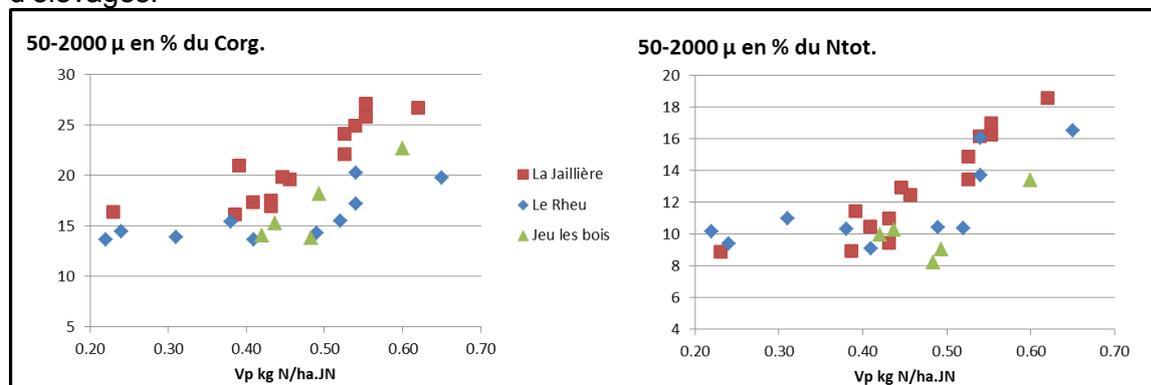
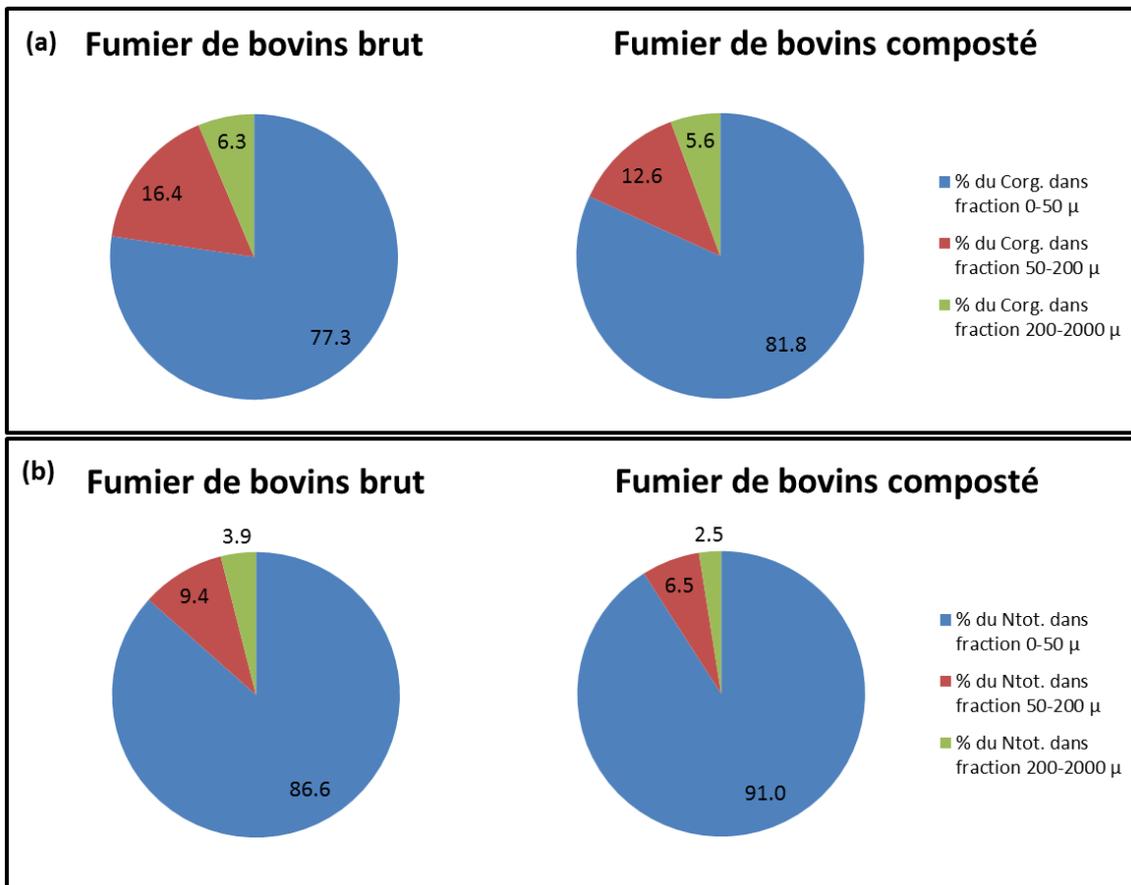


Figure 6: Composition granulométrique du C (a) et N (b) de la couche 0-20 cm des modalités fumiers de bovins bruts et compostés de l'essai de Jeu les bois.



### 10 à 17 ans d'historique de mise en place de couverts végétaux en période d'interculture

Les mesures réalisées dans les 3 essais « couverts intermédiaires » de longue durée (Thibie, Kerlavic, Boigneville-environnement) en 2011 et l'essai Boigneville-comparaison d'espèces de couverts en 2014, montrent que la mise en œuvre répétée de couverts pendant la période d'interculture n'a pas impacté significativement la composition granulométrique du C et N organique, absence d'effet qui peut s'expliquer par le fait que les quantités de carbone et d'azote organique fournies par les couverts au bout de 10 à 17 ans ne sont pas suffisantes pour influencer cet indicateur.

Les autres paramètres mesurés sur les sites de Boigneville et de Thibie, réagissent aux historiques de couverts de manière très variable selon les sites.

Sur le site de Thibie en sol de craie, qui a fait l'objet de prélèvements en 2011 et 2015, aucun effet significatif sur la biomasse microbienne et le potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote organique n'a été observé alors que cet essai implanté depuis 1991 montre des effets rendements significatifs entre le sol nu et couvert, en partie expliqué par un supplément de minéralisation d'azote organique du sol consécutif à la mise en place répétée des couverts.

Dans l'essai Boigneville-Environnement la biomasse microbienne et le potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote organique ne sont pas significativement impactés par l'historique de couverts dans le sol labouré. Seule la biomasse microbienne dans l'horizon 0-12 cm en semis direct est significativement augmentée avec l'historique de couverts. Contrairement aux essais de Thibie et de Kerlavic, le suivi au champ réalisé sur cet essai en vue de quantifier la minéralisation d'azote, ne met pas en évidence de supplément de minéralisation de l'azote organique lié à la mise en place répétée de couverts pendant 19 ans. Cette particularité de l'essai de Boigneville en partie expliquée par une biomasse et un

C/N de la moutarde utilisée comme couvert, plus faibles que sur les 2 autres essais, est cohérente avec l'absence d'effets significatifs sur les bioindicateurs mesurés.

Dans l'essai Boigneville-comparaison d'espèces de couverts, où des couverts ont été mis en place tous les ans pendant 10 ans, la biomasse microbienne et le potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote ainsi que l'azote organique labile, se différencient selon les espèces avec des valeurs significativement plus élevées pour les modalités avec des légumineuses. La différence de réponse des bioindicateurs à un historique de couverts en interculture dans les deux essais de Boigneville, peut s'expliquer par la biomasse plus importante des couverts (valeur moyenne de 1.3 à 3.5 t MS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> selon les espèces) et la présence de légumineuses, dans l'essai comparaison d'espèces de couverts (Bouthier et al., 2015).

### 8 à 40 ans de non labour:

Les 3 essais comparant du labour à une modalité en semis direct ou en travail superficiel, ont été échantillonnés sur deux horizons dans les modalités sans labour, afin d'évaluer l'impact de sa suppression sur la stratification verticale des bioindicateurs. Sur des essais qui cumulent entre 8 et 40 ans de non labour, on observe que CMIN28j NMIN28j et BMI se différencient de manière plus marquée que la teneur en Corg. et Ntot., et le gradient s'amplifie en présence de couverts végétaux comme le montrent les résultats de l'essai Boigneville-environnement. Mais le niveau de ces 3 bioindicateurs dans l'horizon sous-jacent non travaillé (10-25 cm) significativement plus faible que dans l'horizon 0-25 cm du labour, conduit à une valeur moyenne sur 0-25 cm (pondérée par l'épaisseur et la densité apparente des deux horizons) peu différente du labour.

Les suivis au champ de minéralisation d'azote organique réalisés sur les 2 essais travail du sol de Boigneville ne mettent pas en évidence d'écart de vitesse potentielle de minéralisation (Vp en kg N.ha<sup>-1</sup>.JN<sup>-1</sup>) entre labour et semis direct ou travail superficiel (Mary et al., 2014).

A l'inverse de la biomasse microbienne et du potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote organique, les fractions granulométriques du C et du N ainsi que le carbone organique labile et la FDA se différencient peu selon la profondeur sur ces 3 essais.

Cette stratification plus ou moins forte selon les bioindicateurs est aussi observée sur 22 parcelles en agriculture de conservation entre 2 et 20 ans après le dernier labour, analysées au printemps 2013 (figure 8) et confirme les références bibliographiques(Carter et al., 1982).

Figure 7 : Rapport de la teneur sur 0-10 cm à celle sur 10-20 cm, en Corg., Ntot. et 9 bioindicateurs sur les 3 essais travail du sol de longue durée

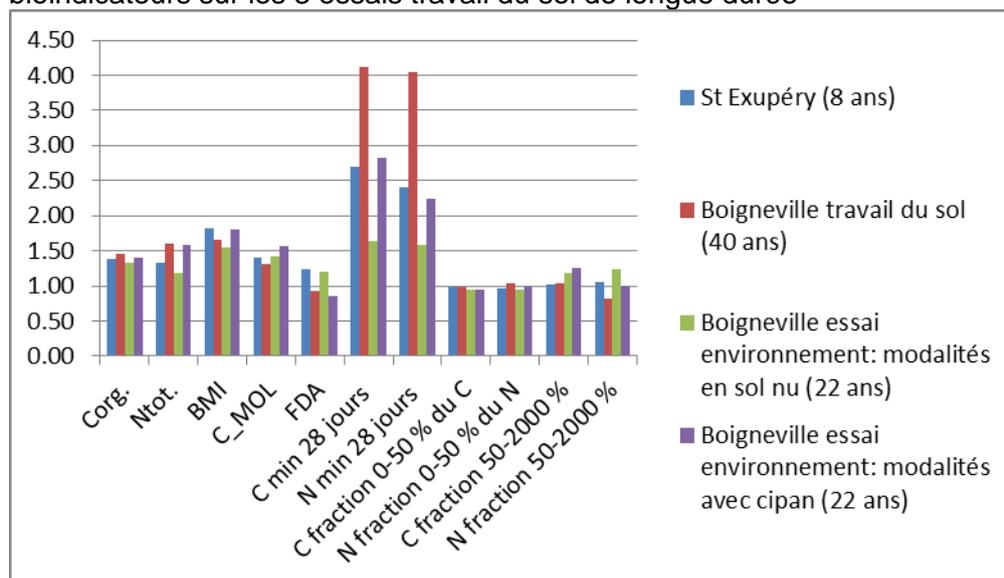
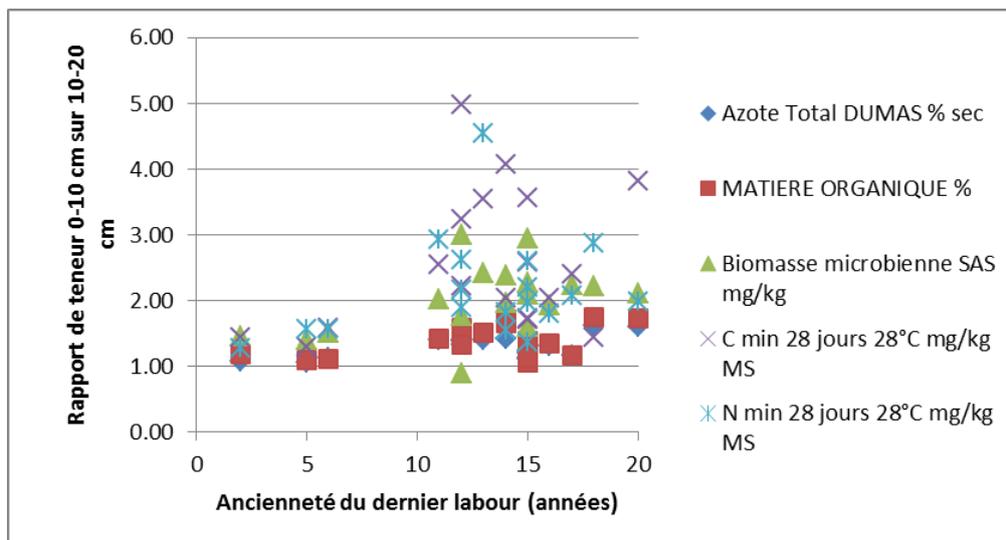


Figure 8 : Rapport de la teneur sur 0-10 cm à celle sur 10-20 cm en Corg., Ntot. et pour 3 bioindicateurs, selon l'ancienneté du dernier labour sur 22 parcelles en agriculture de conservation échantillonnées en 2013



### « Réponse » des bioindicateurs à quelques systèmes de cultures

Sur le dispositif des fermes de Boigneville, implanté sur un sol limono-argileux moyennement profond (60 cm) sur calcaire de Beauce, les comparaisons entre systèmes de culture portent sur les mesures de bioindicateurs à deux dates communes à tous les systèmes. Les analyses ont été réalisées sur des échantillons issus de prélèvements de la couche 0-20 cm des systèmes raisonné, intégré et bio, et des couches 0-10 et 10-20 cm dans les 2 systèmes en non labour (SCV et monoculture de blé).

Les systèmes de culture se différencient peu sur les teneurs en C et N organique, excepté la teneur en C et N organique plus élevée dans les horizons 0-10 cm des 2 systèmes en non-labour (SCV et monoculture de blé). La comparaison des teneurs en Corg. et Ntot. mesurées en 2014-2015, avec celles mesurées en 2008 et 2011, montrent par ailleurs une stabilité des teneurs pour tous les systèmes au cours des 8 dernières années.

Contrairement à la teneur en Corg. et Ntot., les bioindicateurs mesurés en 2014-2015, « répondent » plus ou moins fortement à certains systèmes de culture (figure 9).

Par rapport au système raisonné pris comme référence, la monoculture de blé montre sur 0-10 cm mais également sur 10-20 cm, les écarts positifs les plus importants de tous les systèmes, sur BMI, CMIN28j et FDA, probablement en lien avec les restitutions de carbone de ce système (qui produit et restitue le plus de biomasse végétale) les plus élevées.

Le système SCV implanté depuis 2010 sur une parcelle conduite en non labour depuis 1994 conduit à une fraction 50-2000 de C et N organique ainsi qu'une activité FDA sur 0-10 cm plus importantes que sur le système raisonné, et proches des valeurs observées en monoculture.

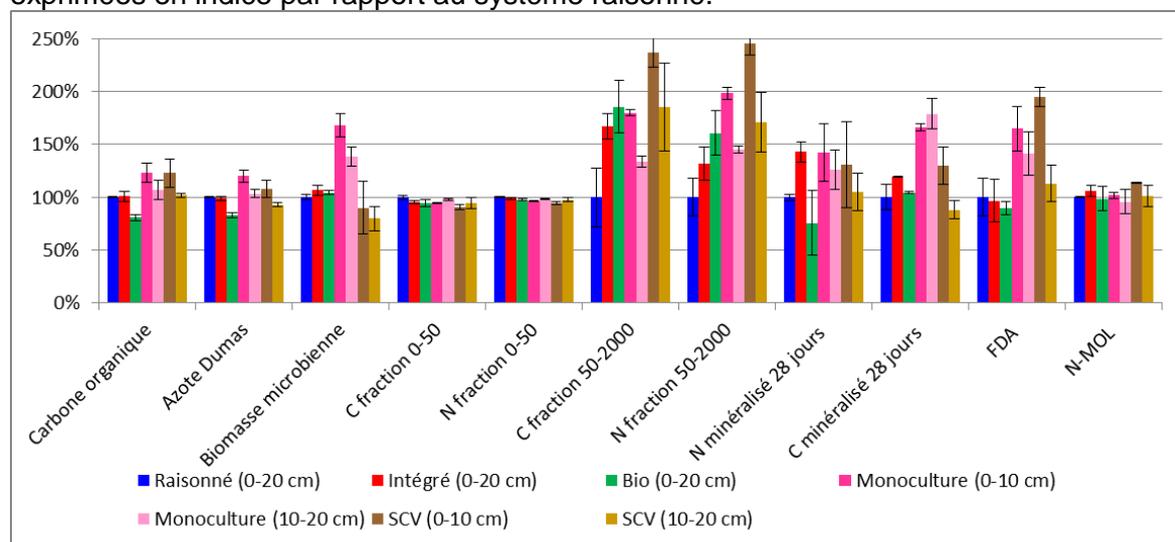
Le système intégré se différencie moins nettement du système raisonné (seulement sur la fraction 50-2000 de C et N organique et de NMIN28j), ce qui peut logiquement résulter de rotations semblables (céréales, colza, protéagineux) avec des niveaux de rendement peu différents (légèrement plus faibles pour le système intégré).

Le système bio est le seul dont la teneur en Corg et Ntot. est plus faible que le système raisonné. Mais au vu de l'analyse réalisée à l'implantation de ce système en 2008, qui montre une teneur identique à celles de 2014-2015, cet écart avec les autres systèmes n'est pas imputable au système bio. Le système bio a fait l'objet lors de son implantation, d'analyses de la biomasse microbienne, du fractionnement granulométrique du Corg. et du potentiel de minéralisation du carbone et azote, et montre une relative stabilité de ces paramètres entre 2008 et 2015.

Dans l'essai système de St Exupéry, en monoculture de maïs, les 2 systèmes de culture (système intensif et système à faible niveau d'intrants) mis en place 8 ans avant la date de prélèvement, ne sont pas encore différenciés sur la teneur en Corg. et Ntot. alors que la fraction granulométrique 50-2000 du C et N organique et le NMIN28j sont significativement plus élevés dans le système intensif. Ces résultats suggèrent comme dans les fermes de

Boigneville, un effet des restitutions de carbone plus importantes dans le système intensif, liées aux rendements plus élevés (écart de rendement moyen de 20 q/ha entre les deux systèmes).

Figure 9 : Teneurs en Corg., Ntot., et 9 indicateurs sur les 5 systèmes de culture des fermes de Boigneville : valeur moyenne de deux dates de mesure (avril 2014 et avril 2015) exprimées en indice par rapport au système raisonné.



## Conclusions et perspectives

Le principal objectif de cette étude dont l'originalité est de prendre appui sur des essais de moyenne et longue durée, était de rendre compte de l'intérêt des bioindicateurs pour évaluer, en complément des paramètres classiques (carbone organique et azote total), les impacts de pratiques culturales susceptibles de modifier à moyen terme les fonctions de recyclage de N et de transformation du C du sol.

La pertinence des bioindicateurs va en partie dépendre de la précision de leur mesure, laquelle est conditionnée par la gestion du prélèvement d'échantillon de terre au champ. Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude permettent de préciser les ordres de grandeur de la variabilité spatiale et temporelle des bioindicateurs et fournissent des bases pour la gestion des prélèvements (période de prélèvement, mode d'échantillonnage).

Tout d'abord l'analyse de la variabilité spatiale sur l'ensemble des dispositifs avec des répétitions a montré que la variabilité des bioindicateurs reste du même niveau que celle du Corg., mais peut être plus importante pour certains en raison notamment d'une plus grande sensibilité aux variations induites par les pratiques culturales récentes (état structural ...).

En l'absence d'études d'échantillonnage spécifiques, les règles en vigueur pour les paramètres physico-chimiques classiques peuvent être appliquées aux bioindicateurs avec toutefois une plus grande vigilance sur les facteurs d'hétérogénéité, notamment l'état structural.

Le suivi sur les fermes de Boigneville, avec 5 prélèvements réalisés sur 16 mois en respectant certaines règles en termes d'état (humidité, température) et d'occupation du sol pour limiter l'impact des facteurs de variation, montre que pour les bioindicateurs les plus sensibles aux fluctuations saisonnières (BMI, FDA, CMIN28j, NMIN28j), la variabilité temporelle apparaît également un peu plus importante mais contenue dans une gamme acceptable.

La mesure des bioindicateurs dans des parcelles en non labour, pose aussi la question de la stratification de l'échantillonnage face aux gradients parfois importants induits par le non labour. Les mesures réalisées sur les essais travail du sol suggèrent que si l'objectif assigné

aux bioindicateurs porte sur l'estimation du potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote organique, un prélèvement sur la profondeur de l'ancien labour, peut suffire.

Par rapport à l'objectif de recherche des indicateurs plus précoces et plus sensibles que la teneur en Corg. et Ntot. pour détecter les effets de pratiques de restitutions organiques et de travail du sol, les résultats sont globalement concluants. Ainsi, dans les essais de moyenne durée (de 5 à 10 ans) où la teneur en Corg. et Ntot. ne se différencie pas souvent de manière significative, on observe toujours une réponse significative d'un ou plusieurs bioindicateurs. Dans les essais de plus longue durée, l'amplitude de réponse des bioindicateurs souvent plus importante que celle du Corg., confirme leur plus grande sensibilité et leur meilleure aptitude à prédire les écarts de minéralisation d'azote mesurée au champ.

Mais la diversité des thématiques étudiées (produits résiduaux organiques, couverts végétaux, travail du sol) et des contextes agropédoclimatiques conduit à des conclusions différentes selon les indicateurs.

Le fractionnement granulométrique du C et du N, semble apporter une plus-value assez fréquente à l'analyse de Corg. et Ntot, avec une fraction grossière qui rend bien compte de l'historique de 8 à 10 ans de restitutions organiques annuelles. Toutefois les historiques de couverts végétaux ne sont pas discriminés par ce type d'indicateur probablement plus sensible à des restitutions organiques importantes, et le sont mieux par la biomasse microbienne et les métabolites microbiens azotés.

La faible réponse, de la biomasse microbienne sur les essais avec historiques d'apports de pro (du même ordre de grandeur que la teneur en Corg.), n'est pas conforme aux références bibliographiques. Cela peut s'expliquer par le fait que les analyses ont été réalisées au moins 2 ans après l'arrêt des apports, ce qui a pu atténuer la réponse de cet indicateur plus sensible à l'histoire récente. La FDA hydrolase, seul indicateur d'activité enzymatique testé dans cette étude, ne s'est pas révélée sensible aux facteurs testés dans les essais alors qu'elle a discriminé les systèmes de culture des fermes de Boigneville, de manière comparable aux autres bioindicateurs.

Enfin, la mise en œuvre des bioindicateurs retenus sur deux expérimentations comparant des systèmes ou mode de conduite de culture, conduit à une bonne discrimination des systèmes avec les restitutions de carbone les plus importantes.

## Remerciements

Nous remercions ici toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à ce travail, en particulier : J. Labreuche, A.L. Toupet. C. Toqué, P.Retaureau (ARVALIS).

## Références

- Balesdent J. 1996. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 47, pp 485-493.
- Bouthier A., Trochard R., Valé M., Chaussod R., Nouaïm R. .2014. Elargir le champ de l'analyse de terre à la biologie des sols. *Perspectives Agricoles*, 408, pp 57-60.
- Bouthier A., Trochard R., Valé M., Chaussod R., Nouaïm R. .2014. Les indicateurs évaluent les effets des apports organiques. *Perspectives Agricoles*, 409, pp 52-55.
- Bouthier A., Trochard R., Valé M., Chaussod R., Nouaïm R. .2014. Mesurer les impacts des pratiques culturales. *Perspectives Agricoles*, 415, pp 56-58.
- Bouthier A., Trochard R., Labreuche J., Valé M., Chaussod R. 2015. Couverts végétaux et matières organiques des sols, des effets variés selon les compartiments organiques. *Perspectives Agricoles*, 426, pp 26-28.
- Carter M.R., Rennie D.A. 1982. Changes in soil quality under zero tillage farming systems : distribution of microbial biomass and mineralizable C and N potentials. *Can. J. Soil Sci.*, 62, pp 587-597.

Chaussod R., Houot S. 1993. La biomasse microbienne des sols : perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols. In : Matières organiques et agricultures, Colloque GEMAS-COMIFER (Blois), pp 17-26.

Chaussod R. 1996. La qualité biologique des sols : évaluation et implications. *Etude et Gestion des Sols*, 3, pp 261-277.

Chaussod R., Nouaïm R. 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés. *Perspectives Agricoles*, 272, pp 46-48.

Hassink J. 1994. Active organic matter fractions and microbial biomass as predictors of mineralisation. *Eur. J. Agron.*, 3, pp 257-265.

Loiseau P., Chaussod R. et Delpy R. 1994. Soil microbial biomass and in situ nitrogen mineralization after 20 years of different nitrogen fertilization and forage cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 3, pp 327-332.

Mary B., Cohan J.P., Dimassi B., Recous S., Laurent F. 2014. Effets du travail du sol sur les cycles biogéochimiques de l'azote et du carbone : de la compréhension des mécanismes aux conséquences pour la gestion des pratiques agricoles. *Faut-il travailler le sol ? Editions Quae*, pp 59-84.

Valé M., Bouthier A., Trochard R., Chaussod R., Nouaïm R. 2011. Pertinence de nouveaux indicateurs pour évaluer l'impact des pratiques culturales sur le fonctionnement biologique des sols. 10èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER-GEMAS, Reims, 23-24/11/2011.

Vian J.F., Peigné J., Chaussod R. et Roger-Estrade J. 2009. Effets du mode de travail du sol sur les microorganismes à l'échelle du profil cultural. *Etude et Gestion des Sols*, 16, pp 355-364.