



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org



AFPF – Maison Nationale des Eleveurs – 149 rue de Bercy – 75595 Paris Cedex 12

Tel. : +33.(0)1.40.04.52.00 – Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Française pour la Production Fourragère

Systemes de polyculture-élevage : quels effets des pratiques agricoles sur les teneurs en matières organiques et le fonctionnement microbien du sol ?

C. Petitjean^{1,2}, A. Philibert¹, V. Manneville¹, B. Amiaud^{3†}, A.S. Perrin⁴, X. Charrier⁵, F. Gastal⁵, A. de Vlieghe⁶, K. Willekens⁶, D. Montenach⁷, S. Houot⁸, T. Morvan⁹, S. Piutti²

Les matières organiques du sol sont le pilier de fonctions physiques, chimiques et biologiques des sols. Les micro-organismes du sol sont des acteurs majeurs de la dynamique de ces matières organiques. Dans les agroécosystèmes, quel est l'effet de certaines pratiques agricoles sur cette dynamique et sur le fonctionnement microbien des sols ?

RÉSUMÉ

Six dispositifs expérimentaux (de moyenne à longue durée), situés dans différents contextes pédoclimatiques, ont permis d'étudier les effets, sur la teneur en matières organiques du sol (MOS) et sur le fonctionnement microbien du sol, de pratiques agricoles pouvant être mises en œuvre dans les systèmes de polyculture-élevage. Les résultats obtenus montrent que les pratiques agricoles étudiées (apports d'effluents d'élevage, intégration de prairies temporaires, réduction du travail du sol) peuvent augmenter la teneur en MOS et stimuler significativement certaines activités enzymatiques microbiennes intervenant dans la décomposition des MOS. Ainsi, ces pratiques peuvent renforcer la capacité des sols à fournir des éléments minéraux utilisables par les plantes, dans un contexte de limitation des intrants de synthèse dans les systèmes fourragers.

SUMMARY

Mixed crop-livestock systems: what are the effects of agricultural practices on soil organic matter content and microbial activity?

Soil organic matter (SOM) content drives the physical, chemical, and biological processes taking place in soils because it affects microbial activity. In this study, we asked the following question: in agroecosystems, what are the effects of certain agricultural practices on SOM and the activity of soil microbes? Experiments carried out at six different research facilities were used to explore the impacts of potential agricultural practices used in mixed crop-livestock systems on SOM and the activity of soil microbes. The results show that the agricultural practices studied here (i.e., use of livestock effluent, incorporation of temporary grasslands, reduction in soil preparation) can increase SOM content and significantly boost the activity of certain microbial enzymes that help break down SOM. As a result, these practices reinforce the ability of soils to provide minerals that plants can exploit with a view to limiting the use of synthetic inputs in forage systems.

AUTEURS

1 : Institut de l'Élevage, F-75012 Paris ; caroline.petitjean@agroparistech.fr

2 : Université de Lorraine, INRA, UMR Agronomie et Environnement, F-54518 Vandœuvre-lès-Nancy cedex

3 : Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA, UMR Silva, F-54000 Nancy ; décédé le 29 septembre 2018. Notre collègue a été un acteur majeur de ce travail avec une volonté sans faille de mettre en avant les multiples atouts des systèmes d'élevage pour le fonctionnement des sols.

4 : Terres Inovia, SupAgro, Campus de La Gaillarde, F-34060 Montpellier

5 : INRA, UE FERLUS, F-86600 Lusignan

6 : Research Institute for Agriculture, Fisheries and Food (ILVO), Burg. Van Gansberghelaan 92 box 1, B-9820 Merelbeke (Belgique)

7 : INRA, UE Service d'Expérimentation Agronomique et Viticole, F-68000 Colmar

8 : INRA, AgroParisTech, UMR ECOSYS, F-78850 Thiverval-Grignon

9 : INRA, AgroCampus Ouest, UMR SAS, F-35042 Rennes

MOTS CLÉS : Fertilisation organique, matière organique, prairie permanente, prairie temporaire, rotation culturale, sol, système de polyculture-élevage, travail du sol.

KEY-WORDS : Crop succession, ley, mixed crop-livestock system, organic fertilisation, organic matter, permanent pasture, soil, soil tillering.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Petitjean C., Philibert A., Manneville V., Amiaud B., Perrin A.S., Charrier X., Gastal F., de Vlieghe A., Willekens K., D. Montenach, Houot S., Morvan T., Piutti S. (2018) : «Systèmes de polyculture-élevage : quels effets des pratiques agricoles sur les teneurs en matières organiques et le fonctionnement microbien du sol ?», *Fourrages*, 236, 239-247.

Les sols, par leurs propriétés biologiques et physico-chimiques, assurent des fonctions écologiques supportant un grand nombre de services écosystémiques de régulation, dont la rétention de l'eau, la biofiltration, le stockage de carbone (C) et la fourniture d'éléments minéraux pour les plantes. Les matières organiques du sol (MOS) conditionnent les propriétés physiques (stabilité structurale, rétention d'eau), chimiques (capacité d'échange, pouvoir tampon) et biologiques (source d'énergie et de nutriments pour les organismes vivants) des sols (CALVET *et al.*, 2011). La dynamique des MOS est régulée par des facteurs abiotiques (par exemple la température et l'humidité du sol) et biotiques, notamment **les micro-organismes du sol qui sont des acteurs majeurs de cette dynamique**. En effet, pour répondre à leurs besoins nutritifs, les micro-organismes hétérotrophes synthétisent plusieurs classes d'enzymes qui participent à la décomposition des MOS (MOORHEAD et SINSABAUGH, 2000 ; SCHIMEL et WEINTRAUB, 2003). Le niveau de synthèse de ces enzymes dépend de l'abondance et de la diversité des communautés microbiennes présentes dans le sol, mais également de facteurs abiotiques tels que la teneur en MOS, la disponibilité des éléments minéraux et le pH du sol (CALVET *et al.*, 2011 ; SINSABAUGH *et al.*, 2008). La résultante nette en termes de fourniture en éléments minéraux pour les plantes dépend alors de l'équilibre entre les processus de minéralisation (transformation des constituants organiques en constituants minéraux) et d'organisation (assimilation des éléments minéraux par les micro-organismes conduisant à la formation de constituants organiques dans la biomasse microbienne).

Au sein des agroécosystèmes, **la dynamique des MOS et la fourniture par le sol d'éléments minéraux utilisables par les plantes sont fortement influencées par les pratiques agricoles** mises en œuvre. Depuis les années 1970, la spécialisation des régions d'élevage et de cultures a conduit à une simplification et à un raccourcissement des successions culturales, liés notamment à la réduction du nombre d'espèces cultivées et à la diminution des surfaces en prairies temporaires et/ou artificielles (SCHOTT *et al.*, 2010). Ainsi, la diminution des surfaces de prairies (permanentes et temporaires) au profit de cultures annuelles (particulièrement du maïs fourrager) explique en partie les diminutions de teneur en MOS en France (BALESDENT, 1996). Dans les sols agricoles, **les teneurs en MOS les plus élevées sont souvent mesurées sous les prairies naturelles**, du fait d'une entrée continue de C dans le sol *via* la litière et l'activité du système racinaire (rhizodéposition et turnover). La simplification des systèmes de culture s'est aussi accompagnée de pratiques agricoles renforçant la dépendance aux engrais minéraux (en substitution du recyclage des effluents d'élevage) et intensifiant le travail des sols.

Dans un contexte de renforcement du fonctionnement écologique du sol, le levier agronomique que constitue **l'allongement des successions culturales par diversification des cultures annuelles et/ou intégration de prairies** (temporaires ou artificielles), **peut agir positivement sur la teneur en MOS et donc potentiellement sur le fonction-**

nement microbien du sol (PIUTTI *et al.*, 2015). En effet, certains travaux mentionnent une augmentation de la taille du compartiment microbien (souvent évalué par la mesure de la biomasse microbienne) et/ou du fonctionnement du sol (évalué par des mesures d'activités enzymatiques en lien avec la décomposition/minéralisation des MOS) dans des systèmes de culture intégrant des prairies temporaires (ACCOE *et al.*, 2002 ; ATTARD *et al.*, 2011 ; MURPHY *et al.*, 2007 ; VAN EEKEREN *et al.*, 2008) ou simplement une plus grande diversité de cultures annuelles (ALVEY *et al.*, 2003 ; LARKIN, 2003 ; MCDANIEL *et al.*, 2014).

Si le recours à des engrais de synthèse dans les écosystèmes naturels peut avoir des effets délétères sur les communautés microbiennes du sol (ALLISON et MARTINY, 2008 ; TRESEDER, 2008), la méta-analyse effectuée par GEISELER et SCOW (2014) met en évidence une augmentation significative de l'ordre de 15% de la biomasse microbienne dans des sols cultivés soumis à une fertilisation minérale. Cet effet positif sur la biomasse microbienne peut être attribué à une augmentation de productivité de ces agroécosystèmes fertilisés et, de ce fait, à une augmentation des apports de C *via* les litières. Néanmoins, cette augmentation de la biomasse microbienne n'induit pas d'augmentation significative de certaines activités enzymatiques du sol (GEISELER et SCOW, 2014). A l'inverse, **des apports d'effluents d'élevage vont permettre d'assurer la fourniture au sol d'une grande diversité de substrats organiques labiles** susceptibles d'induire une augmentation de la biomasse microbienne et des activités enzymatiques microbiennes (KALLENBACH et GRANDY, 2011 ; ZHANG *et al.*, 2015), ainsi qu'une augmentation des flux bruts de minéralisation de l'azote (N) (ZHANG *et al.*, 2012).

A contrario, **un travail du sol de type labour peut limiter l'activité des communautés microbiennes du sol** par des changements de biodisponibilité des résidus de culture, d'humidité et de température à une échelle spatiale très localisée. En effet, le travail du sol a une influence sur l'abondance des micro-organismes du sol, leur diversité et leurs activités (ATTARD *et al.*, 2011 ; BOUTHIER *et al.*, 2014 ; RECOUS *et al.*, 2015). Les résultats de la méta-analyse réalisée par ZUBER et VILLAMIL (2016) montrent que, dans des systèmes agricoles avec labour, la biomasse microbienne et certaines activités enzymatiques en lien avec les cycles du carbone et de l'azote sont significativement réduites, en comparaison avec des systèmes sans travail du sol.

Au regard de ces différentes informations, la présente étude s'est focalisée sur trois types de pratiques agricoles pouvant être mises en œuvre dans les systèmes de polyculture-élevage : apports d'effluents d'élevage (fumier bovin), intégration de prairies temporaires, réduction du travail du sol. L'objectif de cet article est **d'évaluer, sur six dispositifs expérimentaux, les impacts de ces pratiques agricoles sur les teneurs en MOS et sur des variables microbiennes des sols**, biomasse microbienne et activités enzymatiques en lien avec la décomposition/minéralisation des MOS.

| Gestionnaire du dispositif* | Localisation (département) | Année d'installation | Texture dominante (0-15 cm) |
|-----------------------------|--|----------------------|---|
| INRA SOERE PRO | - Colmar (68), site PRO'spective - Le Rheu (35), site EFELE | 2000 2012 | Limono-argileuse / limoneuse Limoneuse |
| INRA SOERE ACBB | - Lusignan (86) | 2005 | Limoneuse |
| ILVO | - Merelbeke, Belgique | 2007 | Sablo-limoneuse |
| Terres Inovia | - Doignies (59) - Villedieu/Indre (36) | 2010 2009 | Limoneuse Argilo-sableuse |

* INRA : Institut National de la Recherche Agronomique ; SOERE : Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement ; PRO : Produits Résiduaux Organiques ; EFELE : Effluents d'Élevage et Environnement ; ACBB : Agroécosystème, Cycle Biogéochimique et Biodiversité ; ILVO : Research Institute for Agriculture, Fisheries and Food.

TABLEAU 1 : Dispositifs expérimentaux sollicités pour l'étude.

TABLE 1 : Research facilities contributing results to this study.

1. Matériel et méthodes

■ Dispositifs expérimentaux et pratiques agricoles comparées

Les dispositifs expérimentaux retenus pour l'étude se situent dans différents contextes pédoclimatiques et ont été mis en place au minimum depuis quatre ans au moment des prélèvements de sols (tableau 1).

Pour chacun des dispositifs, le nombre de blocs mis en place, le nombre de parcelles étudiées ainsi que les pratiques agricoles comparées (cf. ci-après les modalités) sont présentés dans le tableau 2.

Les dispositifs suivis étudient les effets de différents types de pratiques :

- Sur les dispositifs du SOERE PRO (Colmar et EFELE au Rheu), les modalités comparées diffèrent par les

apports d'engrais minéraux et organiques ; la rotation est identique pour toutes les parcelles d'un même dispositif. A Colmar, la rotation est maïs/blé/betterave/orge de printemps avec un labour (0-30 cm) annuel, alors qu'au Rheu (EFELE), la rotation est maïs/blé-CIPAN avec un labour (0-25 cm) annuel.

- Sur les dispositifs de Lusignan et de Merelbeke, toutes les modalités (cultures annuelles et prairies) sont fertilisées avec des engrais minéraux ; les prairies (temporaires et permanentes) sont exploitées en régime de fauche (pour plus de détails : cf. KUNRATH *et al.*, 2015 pour le site de Lusignan ; SCHRAMA *et al.*, 2016 pour le dispositif de Merelbeke).

- Enfin, les systèmes de culture testés par Terres Inovia (Doignies et Villedieu-sur-Indre) se différencient principalement par une réduction du travail du sol (profondeur et/ou fréquence) et/ou par la diversification des cultures annuelles (tableau 2).

| Dispositif | Modalité 1 | Modalité 2 | Modalité 3 | Modalité 4 |
|---|---|---|---|--|
| Colmar 4 blocs, 16 parcelles | Aucun apport : pas d'apport N minéral | Apports N minéral : apports annuels, entre 46 et 160 U N/ha | Apports de fumier : épandage de fumier tous les 2 ans basé sur 170 kg N total/ha | Apports de fumier + N minéral : fumier tous les 2 ans (170 kg N total/ha) + apports annuels N minéral (entre 34 et 116 U N/ha) |
| Le Rheu 4 blocs, 16 parcelles | Aucun apport : pas d'apport N minéral | Apports N minéral : apports annuels, entre 80 et 120 U N/ha | Apports de fumier : épandage tous les 2 ans : 50 t/ha | Apports de fumier + N minéral : épandage de fumier tous les 2 ans : 50 t/ha + apports annuels N minéral (entre 30 et 120 U N/ha) |
| Lusignan 4 blocs, 16 parcelles | Cultures annuelles : maïs/blé/orge d'hiver | Intégration 3 ans PT : maïs/blé/orge d'hiver/ 3 ans PT (graminées) | Intégration 6 ans PT : 6 ans PT (graminées)/ maïs/blé/orge d'hiver | Prairie permanente : graminées |
| Merelbeke 3 blocs, 9 parcelles | Monoculture : maïs | Intégration 1 an PT : maïs/1 an PT (ray-grass d'Italie, RGI)/RGI + sorgho | Prairie permanente : ray-grass anglais | |
| Doignies 3 blocs, 6 parcelles | SC en conduite raisonnée : féverole/blé/betterave/blé/ colza/blé, labour (0-25 cm) et travail peu profond (0-15 cm) | SC "innovant" : lin de printemps/betterave/ blé/féverole/colza/blé travail peu profond (0-15 cm) | | |
| Villedieu/Indre 3 blocs, 9 parcelles | SC, conduite conventionnelle : orge d'hiver/colza/blé, travail du sol superficiel (0-10 cm) | SC en semis direct : orge d'hiver/colza/blé, semis direct (0-5 cm) | SC "innovant" : orge d'hiver/ tournesol/blé/pois d'hiver/colza/blé, semis direct (0-5 cm) et travail du sol superficiel (0-10 cm) | |

* N : azote ; U N : unité d'azote ; PT : prairie temporaire ; SC : système de cultures

TABLEAU 2 : Présentation des dispositifs expérimentaux.

TABLE 2 : Description of the experimental set-up.

■ Prélèvements des échantillons de sols

Tous les échantillons de sols ont été prélevés entre les mois de mars et de mai 2016. Le sol du dispositif de Ville-dieu-sur-Indre étant superficiel, la **profondeur 0-15 cm** a été retenue pour cette étude, afin de pouvoir prélever à la même profondeur dans chaque dispositif.

Dans chacune des **72 parcelles étudiées** (tableau 2), un échantillon composite de sol, constitué de 15 sous-échantillons, a été réalisé. Pour cela, un quadrat (1 m de côté) a été utilisé : les prélèvements sont effectués dans les quatre angles et au centre du quadrat ; l'opération est répétée à trois endroits différents, représentatifs de la parcelle. Pour le dispositif EFELE du Rheu, les 15 sous-échantillons ont été prélevés autour de six jalons répartis sur la parcelle (2 ou 3 sous-échantillons autour de chaque jalon).

■ Mesure de la biomasse microbienne

La biomasse microbienne correspond à l'ensemble des micro-organismes (bactéries, champignons...) du sol. Ainsi, la mesure de la biomasse microbienne évalue la taille du compartiment microbien présent dans le sol. La méthode utilisée pour le dosage de la biomasse microbienne du sol est celle de la fumigation-extraction (VANCE *et al.*, 1987). Cette méthode permet de déterminer le C organique extractible d'origine microbienne, suite à un traitement biocide avec des vapeurs de chloroforme pendant 16 heures. La quantité de C extractible d'origine microbienne (exprimée en mg de C par kg de sol sec) peut être convertie en biomasse microbienne en la divisant par le coefficient $K_{EC} = 0,45$.

■ Mesure des activités enzymatiques microbiennes

Six activités enzymatiques microbiennes impliquées dans différentes étapes de la décomposition des MOS ont été mesurées. Ces activités enzymatiques interviennent, plus ou moins spécifiquement, dans quatre grands cycles biogéochimiques :

- **cycle de l'azote** : les protéases (hydrolyse des liaisons peptidiques des protéines), les arginine aminopeptidases et leucine aminopeptidases (hydrolyse des liaisons peptidiques des peptides) ;

- **cycle du carbone** : les β -glucosidases (hydrolyse des oligosaccharides) ;

- **cycle du soufre** : les arylsulfatases (hydrolyse des esters de sulfates) ;

- **cycle du phosphore** : les phosphatases acides (hydrolyse des esters de phosphate).

Les activités des protéases (exprimées en μg de tyrosine/heure/g de sol sec) ont été déterminées par colorimétrie (LADD et BUTLER, 1972), les autres activités enzymatiques (exprimées en nmol/h/g sol sec) par fluorimétrie (d'après FENG *et al.*, 2016 ; MARX *et al.*, 2001 ; NIEMI et VEPSÄLÄINEN, 2005). Il s'agit de mesures d'activités enzymatiques potentielles, c'est-à-dire des mesures réalisées en conditions

contrôlées (notamment de pH, de température et de substrats en quantité non limitante), reflétant la capacité potentielle du sol à réaliser ces activités de décomposition des MOS en conditions optimales.

■ Mesure de la teneur en carbone organique des sols

Les teneurs en C organique des sols ont été déterminées par le laboratoire Auréa Agrosociétés selon la méthode Anne (méthode interne selon NF ISO 14235). La teneur en MOS est obtenue en multipliant la teneur en C organique par le coefficient 1,72.

■ Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R version 3.4.3.

Pour chaque dispositif expérimental, une **analyse en composantes principales (ACP) normée** a été réalisée avec, comme variables actives, les sept variables microbiennes et, comme variable illustrative, les pratiques agricoles étudiées (package ade4, DRAY et DUFOUR, 2007 ; package FactoMineR, HUSSON *et al.*, 2015). Les ACP réalisées pour les dispositifs de Colmar, Lusignan, Doignies et Ville-dieu-sur-Indre sont présentées dans cet article.

Les ACP permettent de décrire les parcelles (appelées individus) en prenant en compte simultanément, pour chacune d'entre elles, les valeurs des sept variables microbiennes mesurées. Chaque ACP permet de visualiser et d'analyser :

- les corrélations entre les variables microbiennes mesurées (cercle des corrélations) ;

- la dispersion des individus les uns par rapport aux autres (graphique des individus).

Le premier plan factoriel d'une ACP correspond à la représentation graphique selon les axes factoriels 1 et 2.

Au sein de chaque dispositif, les effets des pratiques agricoles (modalités) sur la teneur en MOS et sur les variables microbiennes ont été analysés par des tests de Friedman (HOLLANDER et WOLFE, 1973) et, le cas échéant, des tests post-hoc ont été effectués (package pggirmess, GIRAUDOUX, 2015). Un risque de première espèce (α) de 5% a été retenu pour les tests.

2. Résultats et discussion

■ Effets des apports de fumier bovin

• Dispositif de Colmar

Pour le dispositif de Colmar, les effets des quatre modalités, sur les variables microbiennes étudiées, apparaissent distincts sur le premier plan factoriel de l'ACP (figure 1). Sur le premier plan factoriel, on cumule 68,6% d'inertie (50,2% selon l'axe 1 + 18,4% selon l'axe 2), ce qui

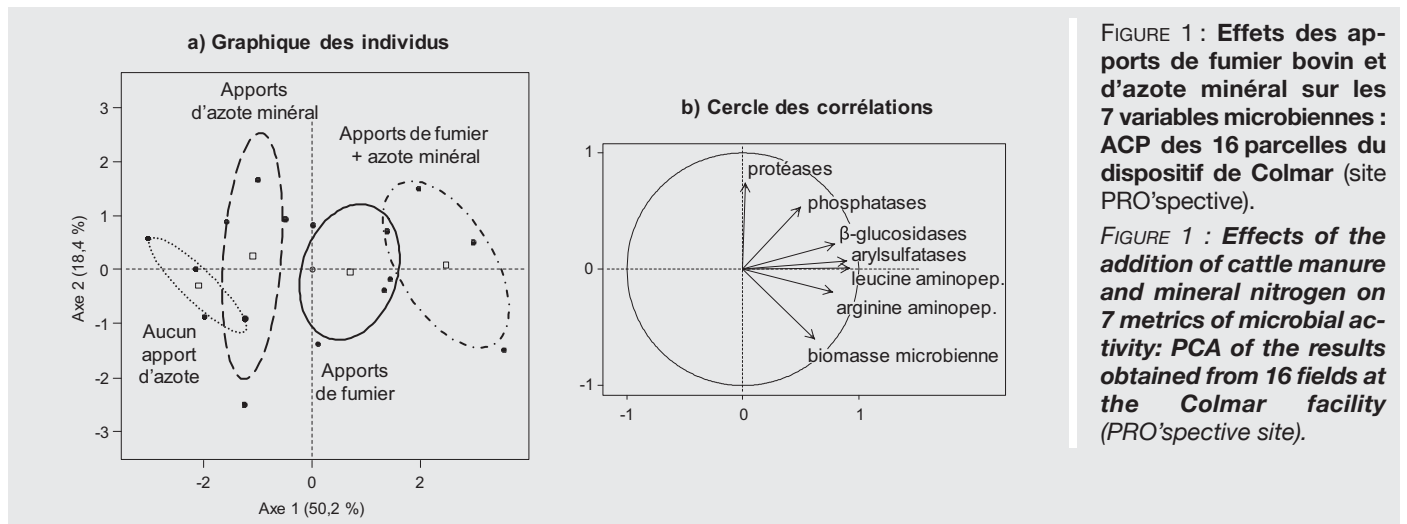


FIGURE 1 : Effets des apports de fumier bovin et d'azote minéral sur les 7 variables microbiennes : ACP des 16 parcelles du dispositif de Colmar (site PRO'spective).

FIGURE 1 : Effects of the addition of cattle manure and mineral nitrogen on 7 metrics of microbial activity: PCA of the results obtained from 16 fields at the Colmar facility (PRO'spective site).

signifie que le graphique permet de synthétiser 68,6 % de l'information contenue dans les données. Sur le graphique des individus (figure 1a), on observe sur l'axe 1, un gradient de fertilisation (organique *versus* minérale) lié à la nature des engrais apportés. Les parcelles ayant reçu des apports de fumier bovin (non composté), avec ou sans azote minéral, présentent des coordonnées positives sur l'axe 1 contrairement aux parcelles n'en ayant pas reçu. **Ces apports de fumier sont à l'origine d'une augmentation significative de la teneur en MOS** de 14 % (parcelles ayant

reçu uniquement des apports de fumier) et de 18 % (parcelles ayant reçu des apports de fumier + N minéral) en comparaison avec les parcelles ayant reçu uniquement des apports d'azote minéral (tableau 3). Nos résultats montrent également une **tendance à l'augmentation de la biomasse microbienne** de 28 % (parcelles ayant reçu uniquement des apports de fumier) et de 50 % (parcelles ayant reçu des apports de fumier + N minéral) en comparaison avec les parcelles ayant reçu uniquement des apports d'azote minéral (tableau 3).

| Dispositifs Modalités* | Biomasse microbienne (mg C/kg) | Arginine aminopep.* (nmol/h/g) | Leucine aminopep. (nmol/h/g) | Phosphatase acide (nmol/h/g) | β-glucosidase (nmol/h/g) | Arylsulfatase (nmol/h/g) | Protéase* (μg tyr./h/g) | Teneur en MOS (%) |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Colmar | | | | | | | | |
| Aucun apport | 336,0 ^a ± 16,7 | 200,3 ^a ± 12,5 | 208,1 ^a ± 9,3 | 235,9 ^a ± 3,8 | 371,8 ^a ± 14,3 | 8,8 ^a ± 0,4 | 65,3 ^a ± 5,6 | 1,89 ^{ab} ± 0,01 |
| Apports N min. | 287,6 ^a ± 36,1 | 221,5 ^a ± 13,7 | 216,0 ^{ab} ± 8,2 | 231,5 ^a ± 14,6 | 477,1 ^{ab} ± 13,4 | 9,4 ^{ab} ± 0,3 | 70,0 ^a ± 11,6 | 1,83 ^a ± 0,03 |
| Apports fumier | 367,1 ^a ± 25,7 | 234,1 ^a ± 4,4 | 243,3 ^{ab} ± 11,4 | 261,6 ^a ± 9,4 | 434,3 ^{ab} ± 15,9 | 11,8 ^{ab} ± 0,2 | 60,1 ^a ± 6,5 | 2,09 ^b ± 0,04 |
| Apports fumier+N min. | 432,5 ^a ± 66,3 | 249,9 ^a ± 8,0 | 266,9 ^b ± 8,2 | 257,3 ^a ± 2,7 | 555,1 ^b ± 25,3 | 12,5 ^b ± 0,2 | 69,2 ^a ± 9,3 | 2,17 ^b ± 0,08 |
| Le Rheu | | | | | | | | |
| Aucun apport | 200,5 ^a ± 20,4 | 141,3 ^a ± 22,5 | 223,2 ^a ± 21,9 | 811,9 ^a ± 47,9 | 445,6 ^a ± 27,8 | 107,3 ^a ± 13,1 | 105,6 ^a ± 3,6 | 1,79 ^{ab} ± 0,06 |
| Apports N min. | 156,4 ^a ± 15,5 | 141,0 ^a ± 19,4 | 210,8 ^a ± 20,7 | 929,7 ^a ± 41,7 | 522,7 ^a ± 52,9 | 112,7 ^a ± 14,1 | 105,7 ^a ± 6,6 | 1,74 ^a ± 0,05 |
| Apports fumier | 173,7 ^a ± 36,8 | 168,7 ^a ± 17,7 | 236,6 ^a ± 21,0 | 873,2 ^a ± 26,1 | 516,2 ^a ± 21,7 | 115,9 ^a ± 6,0 | 119,3 ^a ± 2,4 | 1,84 ^{ab} ± 0,04 |
| Apports fumier+N min. | 232,9 ^a ± 42,7 | 159,3 ^a ± 5,9 | 248,0 ^a ± 16,3 | 909,3 ^a ± 54,8 | 519,3 ^a ± 46,7 | 90,6 ^a ± 5,7 | 129,1 ^a ± 3,5 | 1,96 ^b ± 0,06 |
| Lusignan | | | | | | | | |
| Cultures annuelles | 121,6 ^a ± 14,4 | 138,9 ^a ± 11,0 | 162,4 ^a ± 5,2 | 921,4 ^a ± 15,6 | 409,1 ^a ± 35,8 | 28,3 ^a ± 1,8 | 93,0 ^a ± 3,0 | 1,59 ^a ± 0,06 |
| Intégration 3 ans PT | 173,1 ^a ± 35,4 | 150,9 ^a ± 6,8 | 187,6 ^{ab} ± 9,9 | 1210,2 ^{ab} ± 42,2 | 579,9 ^{ab} ± 11,7 | 53,6 ^{ab} ± 4,5 | 111,7 ^{ab} ± 4,6 | 1,70 ^{ab} ± 0,03 |
| Intégration 6 ans PT | 161,0 ^a ± 12,5 | 148,5 ^a ± 14,3 | 207,0 ^b ± 8,1 | 1289,0 ^{ab} ± 51,8 | 554,5 ^{ab} ± 48,5 | 58,0 ^{ab} ± 5,6 | 122,8 ^{ab} ± 5,2 | 1,92 ^{ab} ± 0,05 |
| Prairie permanente | 180,5 ^a ± 30,8 | 186,3 ^a ± 30,8 | 271,1 ^{ab} ± 44,4 | 1561,7 ^b ± 102,6 | 716,0 ^b ± 51,7 | 74,2 ^b ± 11,4 | 140,8 ^b ± 4,8 | 2,05 ^b ± 0,07 |
| Merlebeke | | | | | | | | |
| Monoculture | 226,3 ^a ± 34,2 | 71,5 ^a ± 17,1 | 98,1 ^a ± 10,6 | 700,2 ^a ± 76,7 | 226,9 ^a ± 28,6 | 24,8 ^a ± 2,8 | 61,5 ^a ± 13,9 | 1,50 ^a ± 0,19 |
| Intégration 1 an PT | 252,1 ^a ± 13,1 | 79,1 ^a ± 4,1 | 95,6 ^a ± 8,7 | 928,4 ^{ab} ± 115,6 | 298,0 ^a ± 31,0 | 32,8 ^{ab} ± 2,2 | 67,9 ^a ± 2,3 | 1,58 ^a ± 0,03 |
| Prairie permanente | 343,2 ^a ± 42,6 | 71,1 ^a ± 9,0 | 107,8 ^a ± 6,3 | 1657,5 ^b ± 310,9 | 365,7 ^a ± 57,8 | 56,7 ^b ± 14,8 | 69,8 ^a ± 10,7 | 2,10 ^a ± 0,44 |
| Doignies | | | | | | | | |
| SC raisonné | 205,0 ^a ± 56,7 | 330,2 ^a ± 36,6 | 345,3 ^a ± 6,9 | 1272,5 ^a ± 120,9 | 604,4 ^a ± 27,6 | 49,3 ^a ± 4,5 | 173,1 ^a ± 2,7 | 2,55 ^a ± 0,13 |
| SC "innovant" | 307,2 ^a ± 5,4 | 374,6 ^a ± 19,2 | 405,3 ^a ± 15,2 | 1330,7 ^a ± 7,8 | 756,8 ^a ± 20,4 | 50,1 ^a ± 2,4 | 176,5 ^a ± 15,8 | 2,81 ^a ± 0,23 |
| Villedieu/Indre | | | | | | | | |
| SC conventionnel | 432,3 ^a ± 91,3 | 314,2 ^a ± 31,0 | 470,4 ^a ± 35,7 | 548,4 ^a ± 17,8 | 930,7 ^a ± 35,8 | 37,2 ^a ± 1,3 | 162,4 ^a ± 23,6 | 3,41 ^a ± 0,91 |
| SC en semis direct | 493,2 ^a ± 132,0 | 342,9 ^a ± 56,9 | 455,2 ^a ± 77,8 | 508,8 ^a ± 28,6 | 917,7 ^a ± 125,7 | 41,4 ^a ± 3,2 | 163,3 ^a ± 33,2 | 3,27 ^a ± 0,61 |
| SC "innovant" | 539,3 ^a ± 75,8 | 354,0 ^a ± 60,3 | 477,2 ^a ± 49,4 | 545,7 ^a ± 59,5 | 933,5 ^a ± 67,6 | 41,1 ^a ± 2,5 | 174,5 ^a ± 10,7 | 3,40 ^a ± 0,59 |

* Au sein de chaque dispositif (ligne), et pour chaque variable considérée (colonne), des lettres différentes indiquent une différence significative entre les modalités comparées (Friedman, p-value < 0,05).
aminopep. : aminopeptidase ; tyr. : tyrosine ; N : azote ; min. : minéral ; C : carbone ; PT : prairie temporaire ; SC : système de cultures.

TABEAU 3 : Effets des modalités (pratiques agricoles) sur les variables microbiennes étudiées et les teneurs en MOS (Matière Organique des Sols, moyenne ± erreur type).

TABLE 3 : Effects of agricultural practices on metrics of microbial activity and soil organic matter (SOM) content (mean ± standard error).

Ces résultats sont en accord avec la méta-analyse réalisée par KALLENBACH et GRANDY (2011) qui met en évidence une augmentation moyenne de 36% de la biomasse microbienne suite à des apports d'effluents d'élevage, avec des réponses dépendant des quantités et de la nature des effluents d'élevage mais également des conditions pédo-climatiques (notamment le pH du sol).

Les apports d'effluents d'élevage ont induit sur le dispositif de Colmar **une augmentation de certaines activités enzymatiques microbiennes**, conformément à d'autres études (ZHANG *et al.*, 2015). En particulier, en comparaison aux parcelles n'ayant reçu aucun apport, les parcelles ayant reçu des apports de fumier + N minéral présentent des activités de décomposition des MOS (leucine aminopeptidases, arylsulfatases et β -glucosidases) significativement plus élevées (tableau 3), suggérant un renforcement du fonctionnement microbien des sols (dans les 15 premiers cm) de ces parcelles. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de LIU *et al.* (2010) qui ont observé une augmentation plus importante de la biomasse microbienne et des activités enzymatiques dans des parcelles recevant des effluents d'élevage en association avec la fertilisation minérale ; cette dernière permet de soutenir la croissance microbienne du fait de formes d'azote facilement disponibles (nitrates et ammonium). Sur le dispositif de Colmar, l'augmentation de l'activité arylsulfatase dans les modalités avec apports de fumier pourrait être liée, du fait de la corrélation de cette activité avec la teneur en C organique du sol (DENG et TABATABAI, 1995), à un enrichissement du sol en C.

• Dispositif EFELE

Pour le dispositif EFELE au Rheu, les parcelles ont montré une distribution confondue sur les axes 1 (45,6%), 2 (22,2%) et 3 (12,0%) de l'ACP (résultats non présentés), semblant ne pas indiquer d'effet du type de fertilisation (organique *versus* minérale) sur les variables microbiennes mesurées. Les tests de Friedman n'ont révélé aucune différence significative entre les modalités, ni pour les sept variables microbiennes, ni pour la teneur en MOS (tableau 3). **L'absence de réponse différenciée des variables microbiennes** sur le dispositif EFELE pourrait être liée à une différenciation encore peu marquée des différentes pratiques de fertilisation/amendements du fait d'une mise en place

récente du dispositif (seulement 4 ans avant les prélèvements de sols) et/ou à des paramètres physico-chimiques des sols différents de ceux observés sur le dispositif de Colmar.

■ Effets de l'intégration de prairies dans les systèmes de culture

• Dispositif de Lusignan

Pour le dispositif de Lusignan, les effets des quatre modalités, sur les variables microbiennes mesurées, apparaissent distincts sur le premier plan factoriel de l'ACP (figure 2). Le premier plan factoriel synthétise 75,1 % de l'information contenue dans les données. Le graphique des individus (figure 2a) révèle un positionnement différent des systèmes, avec des coordonnées positives selon l'axe 1 pour les prairies permanentes et des coordonnées négatives pour les systèmes de culture à base d'espèces annuelles. **Les sols de prairies permanentes sont caractérisés par des valeurs significativement plus élevées d'activités phosphatases, β -glucosidases, protéases, arylsulfatases et de teneur en MOS** que les sols des systèmes de culture à base d'espèces annuelles (tableau 3). L'intégration de prairie temporaire (3 ou 6 ans) dans la rotation conduit à des valeurs (moyennes par modalité) de biomasse microbienne, d'activités enzymatiques et de teneur en MOS intermédiaires, comprises entre les systèmes de culture avec strictement des espèces annuelles et les prairies permanentes (tableau 3).

Les résultats que nous avons obtenus sur le dispositif de Lusignan montrent, conformément à la littérature, que l'intégration de prairies temporaires dans les systèmes de culture est un levier agronomique pour augmenter la fertilité des sols (cf. la revue PIUTTI *et al.*, 2015), en favorisant l'augmentation de la teneur en C organique ainsi que le fonctionnement du sol (ACCOE *et al.*, 2002 ; ATTARD *et al.*, 2011 ; MURPHY *et al.*, 2007 ; VAN EEKEREN *et al.*, 2008). Sur le dispositif de Lusignan, d'autres auteurs ont mis en évidence, dans les sols des systèmes intégrant de la prairie temporaire, une augmentation du stockage à long terme du C (PANETTIERI *et al.*, 2017) ainsi qu'une augmentation de la biomasse microbienne et des flux de minéralisation et d'organisation brutes d'azote (ATTARD *et al.*, 2011), en

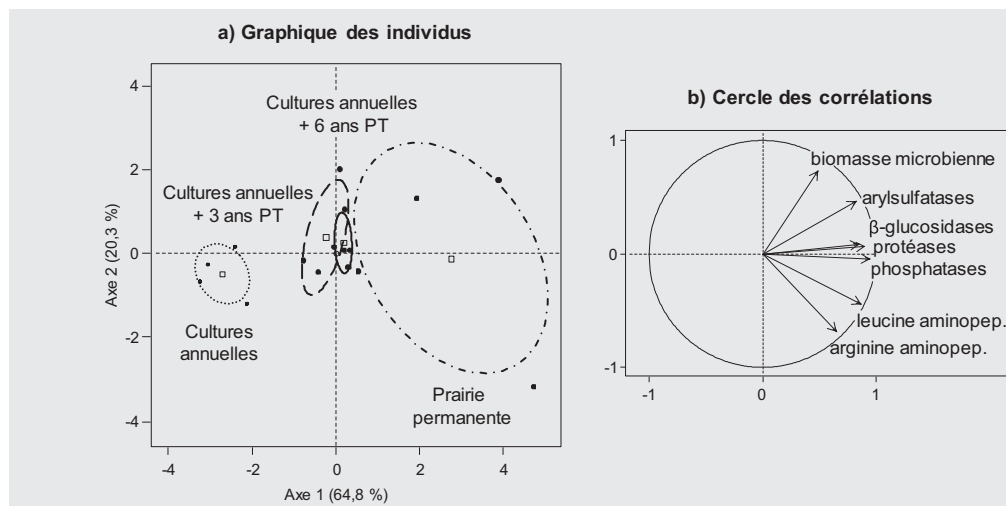


FIGURE 2 : Effets de la présence de cultures annuelles, de prairies temporaires ou permanentes sur les 7 variables microbiennes : ACP des 16 parcelles du dispositif de Lusignan.

FIGURE 2 : Effects of the presence of annual crops, temporary grasslands, and permanent pastures on 7 metrics of microbial activity: PCA of the results obtained from 16 fields at the Lusignan facility.

comparaison avec les sols sous cultures annuelles. Ainsi, **les systèmes de culture intégrant des prairies temporaires ont une position intermédiaire** entre les systèmes de cultures annuelles et les prairies permanentes, en termes de **teneur en MOS et de fonctionnement microbien du sol** (sur la profondeur 0-15 cm).

• Dispositif de Merelbeke

Sur le dispositif de Merelbeke, qui présente des caractéristiques physico-chimiques des sols différentes de Lusignan, les effets des trois modalités comparées, sur les variables microbiennes mesurées, apparaissent également distincts sur les axes 1 (51,2%) et 2 (22,4%) de l'ACP (résultats non présentés). Notamment, **les activités arylsulfatases et phosphatases sont significativement plus élevées sous prairies permanentes que sous monoculture de maïs** (tableau 3). Même si les différences de teneurs en MOS et de biomasse microbienne ne sont pas statistiquement significatives entre les modalités étudiées, nos résultats sont en adéquation avec l'augmentation significative du fonctionnement du sol (minéralisation du C et de l'azote) mise en avant par VAN EEKEREN *et al.* (2008), dans le cadre d'une expérimentation longue durée (36 ans) en Belgique (sols sableux) avec l'intégration de 3 ans de prairies dans la rotation.

■ Effets de systèmes innovants associant réduction du travail du sol et diversification des rotations

• Dispositif de Doignies

Pour le dispositif de Doignies, l'effet du système de culture « innovant » (avec techniques culturales sans labour) sur les variables microbiennes mesurées est distinct de celui produit par le système de culture « raisonné » (avec labour) sur le premier plan factoriel de l'ACP (figure 3). Pour cette ACP, le premier plan factoriel synthétise 87,8% de l'information contenue dans les données.

Pour ce dispositif de Doignies, nous avons observé une **tendance à l'augmentation** (Friedman, p-value = 0,08) de **la biomasse microbienne et des activités arginine amino-**

peptidases, leucine aminopeptidases et β -glucosidases dans les parcelles du système de culture « innovant » en comparaison à celles du système « raisonné ». Nous n'avons pas observé de différence significative entre les modalités pour la teneur en MOS (tableau 3). Les résultats obtenus sur le dispositif de Doignies suggèrent un début de différenciation entre les deux systèmes testés.

Le travail du sol modifie la concentration et la répartition du C entrant (résidus de cultures, produits résiduels organiques) : ce carbone est dilué dans le profil du sol dans le cas d'un labour profond ; il reste concentré en surface dans le cas d'un travail réduit (ou en absence de travail du sol). Le travail du sol exerce également une action mécanique qui a un impact sur la structure et la porosité du sol, influençant l'environnement physique des micro-organismes. Ainsi, le travail du sol a des impacts sur l'abondance des micro-organismes du sol, leur diversité et leurs activités et, par conséquent, des effets sur la minéralisation des MOS (ATTARD *et al.*, 2011 ; BOUTHIER *et al.*, 2014 ; RECOUS *et al.*, 2015). Des études ont montré que le travail du sol peut entraîner une diminution de la biomasse microbienne, comparativement à des systèmes sans travail du sol (BALOTA *et al.*, 2004 ; KASCHUK *et al.*, 2010 ; ZUBER et VILLAMIL, 2016), avec des effets dépendant notamment de la profondeur et/ou du type d'outil utilisé (ZUBER et VILLAMIL, 2016). Le travail du sol de type labour peut limiter les activités des communautés microbiennes du sol par des changements d'humidité, de température et de biodisponibilité des substrats à une échelle spatiale très localisée. Des travaux ont mis en évidence que l'absence ou la réduction du travail du sol peut favoriser une augmentation des activités enzymatiques (EIVAZI *et al.*, 2003 ; RIFFALDI *et al.*, 2002 ; ROLDÁN *et al.*, 2005 ; ZUBER et VILLAMIL, 2016), notamment *via* l'augmentation de la teneur en matières organiques dans les premiers cm du sol (ROLDÁN *et al.*, 2005).

• Dispositif de Villedieu-sur-Indre

Les parcelles du dispositif de Villedieu-sur-Indre présentent une distribution confondue sur les axes 1 et 2 de l'ACP (figure 3), suggérant un **effet indifférencié des trois modalités de systèmes de culture** sur les variables microbiennes mesurées. Pour ce dispositif, nous n'avons observé

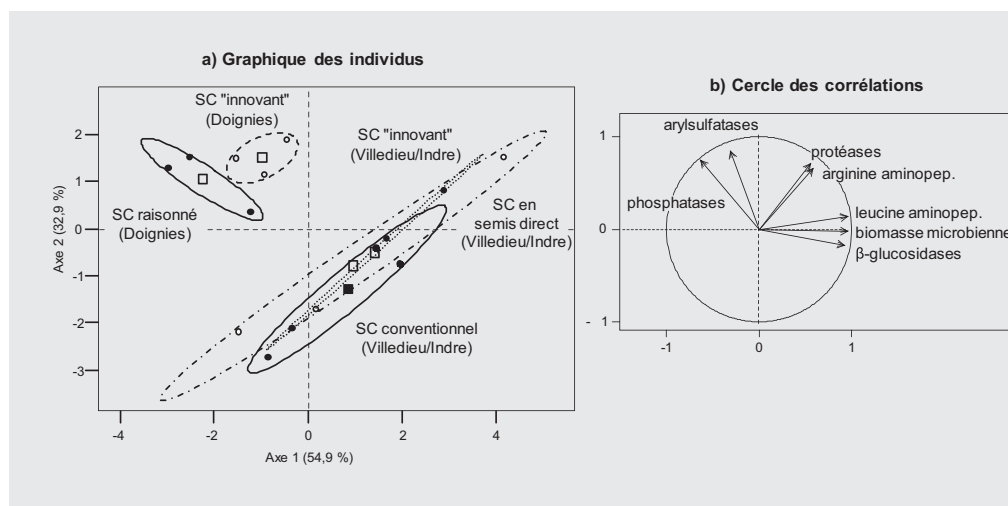


FIGURE 3 : Effets des systèmes de culture sur les 7 variables microbiennes : ACP des parcelles des dispositifs de Doignies (n=6) et de Villedieu-sur-Indre (n=9).

FIGURE 3 : Effects of crop systems on 7 metrics of microbial activity: PCA of the results obtained at the Doignies facility (n=6) and at the Villedieu-sur-Indre facility (n=9).

aucune différence significative entre les modalités, ni pour les sept variables microbiennes, ni pour les teneurs en MOS (tableau 3).

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer l'absence de différenciation entre les systèmes de culture testés sur le dispositif de Villedieu-sur-Indre :

- la faible différenciation de travail du sol entre les systèmes : les modalités ne concernent que l'intensité du travail d'un sol superficiel (5 ou 10 cm de profondeur) sans comparaison avec une modalité témoin labour profond ;

- l'hétérogénéité des paramètres physico-chimiques des sols au sein du dispositif, notamment une hétérogénéité des teneurs en argile, en calcaire et en C selon les blocs ;

- enfin, la différenciation des systèmes en termes de variables microbiennes n'est peut-être pas encore observable sur ce type de sol qui présente une teneur en MOS relativement élevée (tableau 3).

Conclusion

Le fonctionnement microbien du sol est fortement influencé par la teneur en MOS, ressource énergétique et trophique pour les micro-organismes hétérotrophes. Les entrées de C dans les sols agricoles peuvent être modulées par différentes pratiques, dont certaines étudiées dans ce travail. En effet, l'accumulation de C dans les sols peut résulter d'apports de matières organiques exogènes (par exemple des effluents d'élevage), d'une augmentation de la quantité de litière et/ou de l'activité du système racinaire, d'une réduction du travail du sol (qui entraîne notamment une concentration du C en surface).

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'impact de trois pratiques agricoles (apports de fumier bovin, intégration de prairies temporaires et réduction du travail du sol) sur les teneurs en MOS et sur des variables microbiennes des sols, dans différents contextes pédoclimatiques. Les résultats obtenus viennent compléter les études et synthèses précédemment réalisées en France (par exemple ATTARD *et al.*, 2011 ; BOUTHIER *et al.*, 2014 ; RECOUS *et al.*, 2015) et à l'étranger, concernant les impacts de pratiques agricoles sur la dynamique des MOS et sur le fonctionnement biologique des sols. Nos résultats confirment que les pratiques agricoles étudiées peuvent constituer des leviers d'actions, dans les systèmes de polyculture-élevage, pour renforcer les teneurs en MOS et le fonctionnement microbien des sols.

La biomasse microbienne et les activités enzymatiques mesurées dans notre étude (dans les 15 premiers cm du sol) ont montré une certaine sensibilité pour différencier les pratiques/systèmes agricoles comparés. Ces résultats suggèrent que ces variables microbiennes pourraient être utilisées comme indicateurs biologiques du fonctionnement des sols, en complément des analyses physico-chimiques classiquement réalisées (teneurs en éléments minéraux, teneur en MOS, pH...). La création de référentiels de valeurs de ces indicateurs, obtenues dans divers contextes pédoclimatiques et différents systèmes d'exploitation agricole,

permettrait d'aider le conseil agronomique visant à renforcer (ou maintenir) les teneurs en MOS et le fonctionnement microbien des sols, dans le contexte actuel de diminution de l'utilisation d'intrants de synthèse.

Accepté pour publication,
le 19 novembre 2018

Remerciements : Cette étude a été financée par le Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière (CNIEL). Nous remercions les partenaires (INRA SOERE ACBB, INRA SOERE PRO, Terres Inovia et ILVO) pour l'accès aux dispositifs expérimentaux et pour les renseignements fournis concernant les parcelles étudiées. Les auteurs remercient Valentin Bonetti et Mathilde Moretti pour leur contribution à ce travail dans le cadre de leur stage d'étude. Nos remerciements vont également à Stéphane Cadoux, Gilles Sauzet, Stéphane Schryve et Pierre-Edouard Dery (Terres Inovia).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACCOE F., BOECKX P., VAN CLEEMPUT O., HOFMAN G., HUI X., BIN H., GUANXIONG C. (2002) : «Characterization of soil organic matter fractions from grassland and cultivated soils via C content and $\delta^{13}C$ signature», *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 16, 2157-2164.
- ALLISON S.D., MARTINY J.B. (2008) : «Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities», *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 105, 11512-11519.
- ALVEY S., YANG C.-H., BUERKERT A., CROWLEY D.E. (2003) : «Cereal/legume rotation effects on rhizosphere bacterial community structure in West African soils», *Biol. Fertil. Soils*, 37, 73-82.
- ATTARD E., ROUX X.L., LAURENT F., CHABBI A., NICOLARDOT B. (2011) : «Impacts de changements d'occupation et de gestion des sols sur la dynamique des matières organiques, les communautés microbiennes et les flux de carbone et d'azote», *Etude Gest. Soils*, 18, 147-159.
- BALESDENT J. (1996) : «Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France», *Etude Gest. Soils*, 245-260.
- BALOTA E.L., COLOZZI FILHO A., ANDRADE D.S., DICK R.P. (2004) : «Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol», *Soil Tillage Res.*, 77, 137-145.
- BOUTHIER A., PELOSI C., VILLENAVE C., PERES G., HEDDE M., RANJARD L., VIAN J.F., PEIGNE J., CORTET J., BISPO A., PIRON D. (2014) : «Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique», *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*, J. Labreuche, F. Laurent, J.R. Estrade, coord., Quae, 89-112.
- CALVET R., CHENU C., HOUOT S. (2011) : *Les matières organiques des sols. Rôles agronomiques et environnementaux*, France Agricole éd., Agriproduction, Paris.
- DENG S.P., TABATABAI M.A. (1995) : «Cellulase activity of soils: effect of trace elements», *Soil Biol. Biochem.*, 27, 977-979.
- DRAY S., DUFOUR A.B. (2007) : «The ade4 Package: Implementing the Duality Diagram for Ecologists», *J. Stat. Softw.*, 22.
- EIVAZI F., BAYAN M.R., SCHMIDT K. (2003) : «Select soil enzymes activities in the historic sanborn field as affected by long-term cropping systems», *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 34, 2259-2275.
- FENG X., LING N., CHEN H., ZHU C., DUAN Y., PENG C., YU G., RAN W., SHEN Q., GUO S. (2016) : «Soil ionic and enzymatic responses and correlations to fertilizations amended with and without organic fertilizer in long-term experiments», *Sci. Rep.*, 6.

- GEISSELER D., SCOW K.M. (2014) : «Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms - A review», *Soil Biol. Biochem.*, 75, 54-63.
- GIRAUDOUX P. (2015) : *pgirmess: Data Analysis in Ecology*, R package version 1.6.2. ; <https://CRAN.R-project.org/package=pgirmess>.
- HOLLANDER M., WOLFE D.A. (1973) : *Nonparametric Statistical Methods*, John Wiley & Sons, New York.
- HUSSON F., JOSSE J., LÉ S., MAZET J. (2015) : *FactoMineR: Multivariate exploratory data analysis and data mining*, R package version 1.30 ; <https://CRAN.R-project.org/package=FactoMineR>.
- KALLENBACH C., GRANDY A.S. (2011) : «Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: A meta-analysis», *Agric. Ecosyst. Environ.*, 144, 241-252.
- KASCHUK G., ALBERTON O., HUNGRIA M. (2010) : «Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability», *Soil Biol. Biochem.*, 42, 1-13.
- KUNRATH T.R., DE BERRANGER C., CHARRIER X., GASTAL F., DE FACCO CARVALHO P.C., LEMAIRE G., EMILE J.C., DURAND J.L. (2015) : «How much do sod-based rotations reduce nitrate leaching in a cereal cropping system?», *Agric. Water Manag.*, 150, 46-56.
- LADD J.N., BUTLER J.H.A. (1972) : «Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates», *Soil Biol. Biochem.*, 4, 19-30.
- LARKIN R.P. (2003) : «Characterization of soil microbial communities under different potato cropping systems by microbial population dynamics, substrate utilization, and fatty acid profiles», *Soil Biol. Biochem.*, 35, 1451-1466.
- LIU E., YAN C., MEI X., HE W., BING S.H., DING L., LIU Q., LIU S., FAN T. (2010) : «Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China», *Geoderma*, 158, 173-180.
- MARX M.C., WOOD M., JARVIS S.C. (2001) : «A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils», *Soil Biol. Biochem.*, 33, 1633-1640.
- MCDANIEL M.D., TIEMANN L.K., GRANDY A.S. (2014) : «Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis», *Ecol. Appl.*, 24, 560-570.
- MOORHEAD D.L., SINSABAUGH R.L. (2000) : «Simulated patterns of litter decay predict patterns of extracellular enzyme activities», *Appl. Soil Ecol.*, 14, 71-79.
- MURPHY D.V., STOCKDALE E.A., POULTON P.R., WILLISON T.W., GOULDING K.W.T. (2007) : «Seasonal dynamics of carbon and nitrogen pools and fluxes under continuous arable and ley-arable rotations in a temperate environment», *Eur. J. Soil Sci.*, 58, 1410-1424.
- NIEMI R.M., VEPSÄLÄINEN M. (2005) : «Stability of the fluorogenic enzyme substrates and pH optima of enzyme activities in different Finnish soils», *J. Microbiol. Methods*, 60, 195-205.
- PANETTIERI M., RUMPEL C., DIGNAC M.F., CHABBI A. (2017) : «Does grassland introduction into cropping cycles affect carbon dynamics through changes of allocation of soil organic matter within aggregate fractions?», *Sci. Total Environ.*, 576, 251-263.
- PIUTTI S., ROMILLAC N., CHANSEAUME A., SLEZACK-DESCHAUMES S., MANNEVILLE V., AMIAUD, B. (2015) : «Enjeux et contributions des prairies temporaires pour améliorer la fertilité des sols», *Fourrages*, 223, 179-187.
- RECOUS S., CHABBI A., VERTÈS F., THIÉBEAU P., CHENU C. (2015) : «Fertilité des sols et minéralisation de l'azote?: sous l'influence des pratiques culturales, quels processus et interactions sont impliqués?», *Fourrages*, 223, 189-196.
- RIFFALDI R., SAVIOZZI A., LEVI-MINZI R., CARDELLI R. (2002) : «Biochemical properties of a Mediterranean soil as affected by long-term crop management systems», *Soil Tillage Res.*, 67, 109-114.
- ROLDÁN A., SALINAS-GARCÍA J.R., ALGUACIL M.M., CARAVACA F. (2005) : «Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field», *Appl. Soil Ecol.*, 30, 11-20.
- SCHIMEL J., WEINTRAUB M.N. (2003) : «The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model», *Soil Biol. Biochem.*, 35, 549-563.
- SCHOTT C., MIGNOLET C., MEYNARD J.M. (2010) : «Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture?: évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine», *Ol. Corps Gras Lipides*, 17, 276-291.
- SCHRAMA M., VANDECASTEELE B., CARVALHO S., MUYLLE H., VAN DER PUTTEN W.H. (2016) : «Effects of first- and second-generation bioenergy crops on soil processes and legacy effects on a subsequent crop», *GCB Bioenergy*, 8, 136-147.
- SINSABAUGH R.L., LAUBER C.L., WEINTRAUB M.N., AHMED B., ALLISON S.D., CRENSHAW C., CONTOSTA A.R., CUSACK D., FREY S., GALLO M.E., GARTNER T.B., HOBBIIE S.E., HOLLAND K., KEELER B.L., POWERS J.S., STURSOVA M., TAKACS-VESBACH C., WALDROP M.P., WALLENSTEIN M.D., ZAK D.R., ZEGLIN L.H. (2008) : «Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale: Stoichiometry of soil enzyme activity», *Ecol. Lett.*, 11, 1252-1264.
- TRESEDER K.K. (2008) : «Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies», *Ecol. Lett.*, 11, 1111-1120.
- VANCE E.D., BROOKES P.C., JENKINSON D.S. (1987) : «An extraction method for measuring soil microbial biomass C», *Soil Biol. Biochem.*, 19, 703-707.
- VAN EEKEREN N., BOMMELÉ L., BLOEM J., SCHOUTEN T., RUTGERS M., DE GOEDE R., REHEUL D., BRUSSAARD L. (2008) : «Soil biological quality after 36 years of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping», *Appl. Soil Ecol.*, 40, 432-446.
- ZHANG J.B., ZHU T.B., CAI Z.C., QIN S.W., MÜLLER C. (2012) : «Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations», *Eur. J. Soil Sci.*, 63, 75-85.
- ZHANG Q., ZHOU W., LIANG G., SUN J., WANG X., HE P. (2015) : «Distribution of soil nutrients, extracellular enzyme activities and microbial communities across particle-size fractions in a long-term fertilizer experiment», *Appl. Soil Ecol.*, 94, 59-71.
- ZUBER S.M., VILLAMIL M.B. (2016) : «Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities», *Soil Biol. Biochem.*, 97, 176-187.