

LES ORGANISMES DU SOL COMME INDICATEURS DU FONCTIONNEMENT DES SOLS EN GRANDES CULTURES

J. Amossé^{1,2}, V. Coudrain^{3,4}, M. Bertrand¹, N. Brunet², H. Boizard², E. Bourgeois⁸, M. Chauvat⁵, N. Cheviron⁴, D. Cluzeau⁶, A. Duparque⁷, M. Hedde⁴, J. Léonard², P-A. Maron⁸, S. Recous³

¹INRA Agronomie Grignon, ²INRA AgrolImpact Laon, ³INRA FARE Reims, ⁴INRA ECOSYS Versailles, ⁵Ecodiv EA1293 Univ. Rouen, ⁶EcoBio Univ. Rennes, ⁷Agro-Transfert Ressources et Territoires, ⁸INRA, AgroEcologie Dijon.

Contexte et objectifs

Dans le contexte agricole actuel, le développement d'indicateurs synthétiques (biologiques et/ou physico-chimiques) est une nécessité afin de répondre aux enjeux de la gestion durable des sols cultivés et des services qui lui sont associés : production agricole, cycles des éléments nutritifs et régulation du climat. Le projet SOFIA (Agrosystèmes et biodiversité fonctionnelle des Sols) mobilise les données expérimentales d'un Observatoire de Recherche en Environnement « Agroécosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité » (<http://www.soere-acbb.com/>). Son objectif scientifique a été d'étudier les effets d'un changement de pratiques agricoles en grandes cultures faisant varier la quantité et la localisation des ressources trophiques, sur la dynamique d'évolution de la biodiversité taxonomique et fonctionnelle des communautés vivantes du sol, et sur les cycles biogéochimiques du carbone (C) et de l'azote (N), et de certaines fonctions écosystémiques : production primaire, structuration du sol, émissions de gaz à effet de serre, décomposition et minéralisation des matières organiques. Le projet s'est donné l'ambition de dégager ainsi des bioindicateurs précoces de changement de fonctionnement des sols après modification des pratiques.

Matériel et Méthodes

L'étude a été menée sur le site expérimental SOERE ACBB à Estrées-Mons (Picardie). L'observatoire s'étend sur une surface de huit hectares de terre arable cultivée, avec un historique ancien de rotations de cultures annuelles. Le sol est limoneux profond (Ortic luvisol ; IUSS, 2014). Le dispositif SOERE a été initié en 2009, avec une rotation de six années selon la succession suivante: pois de printemps, blé d'hiver, colza, orge de printemps, maïs et blé d'hiver. L'expérimentation a débuté en mars 2010 avec une combinaison de six traitements définis suivant le niveau de travail du sol (labour vs. travail superficiel), la gestion des résidus (restitution vs. exportation), le niveau de fertilisation (référence vs. 40% de la référence), l'implantation ou non de légumineuses, l'insertion d'une culture pérenne pendant 6 ans (switchgrass) en alternance avec la rotation de cultures annuelles.

Traitement	Rotation	Travail du sol	Résidus de culture	Apport d'azote minéral	Nature de la CIPAN
T1 / CONV	Pois, colza, blé, orge, maïs, blé	labour*	restitution	référence***	pas de légumineuses
T2 / RT	Pois, colza, blé, orge, maïs, blé	superficiel**	restitution	référence	pas de légumineuses
T3 / RT-RR	Pois, colza, blé, orge, maïs, blé	superficiel	exportation	référence	pas de légumineuses
T4 / RN	Pois, colza, blé, orge, maïs, blé	labour	restitution	40 % de la référence****	pas de légumineuses
T5 / RN-LEG	Pois, colza, blé, orge, maïs, blé	labour	restitution	référence	légumineuses
T6 / RR-PER	Switchgrass	superficiel	exportation	référence	pas de légumineuses

Table 1. Description des modalités pour les six traitements du site expérimental SOERE ACBB d'Estrées-Mons.

Le suivi des variables physiques, chimiques et biologiques a été réalisé chaque année (2010, 2012, 2013 et 2014) à la sortie de l'hiver. Les variables physico-chimiques étaient les suivantes : carbone soluble (C_{sol}), carbone de la biomasse microbienne (C_{bm}), azote total (N_{tot}), carbone organique (C_{org}), ratio C/N, diamètre pondéré des agrégats (MWD), nitrates (NO_3^-), pH_{H_2O} et quatre activités enzymatiques (uréase, glucosidase, phosphatase et arylsulfatase). Pour les variables biologiques, l'abondance, la diversité (nombre d'espèces, de genres ou de familles), les groupes fonctionnels des macro-invertébrés (incluant les vers de terre), de la mésofaune (collembolés et acariens) et de la microfaune (nématodes et protistes) ont été étudiés.

Au total, 12 variables physicochimiques, 34 variables biologiques, et les fonctions de minéralisation-organisation brutes de l'azote, de décomposition des résidus et d'émissions de N_2O ont été mesurées sur les parcelles à la surface et/ou dans le sol (couches 0-5, 5-20 ou 0-20 cm) selon les variables considérées. Deux types de modèles de régression, *Random Forest* (RF, Breiman, 2001) (modèle non-linéaire) et la *Partial Least Square* (PLS, Wold et al., 2001) (modèle linéaire), ont été utilisés et comparés, pour identifier les paramètres du sol les plus explicatifs de la fonction de minéralisation de l'azote. Les résultats présentés dans cette communication concernent principalement l'année 2014 (qui montre la plus forte différenciation entre traitements) sur la couche superficielle 0 à 5 cm.

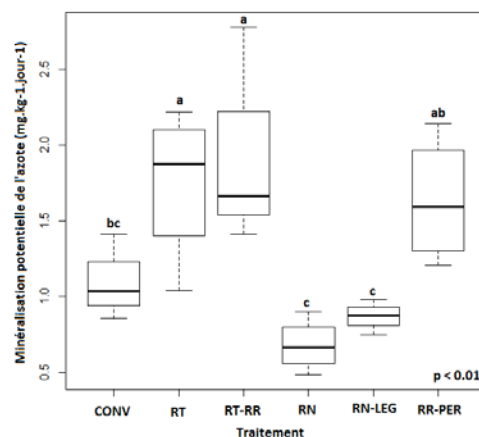
D'autre part, les interactions entre organismes du sol ont été modélisées au moyen d'une approche par réseau trophique basée sur les flux métaboliques (de Ruitter et al. 1995). Différents indices ont été dérivés afin de déterminer la dynamique de la structure des réseaux trophiques en réponse aux changements de pratiques agricoles, ainsi que l'évolution parallèle des réseaux et des fonctions du sol.

Résultats et discussion

Un début de différenciation significative des traitements est apparu à partir de 2012 (+2 ans) pour les traitements avec travail du sol réduit, visible par la stratification dans la couche 0-20 cm du C microbien, d'activités enzymatiques (e.g. uréase, arylsulfatase) et des flux de minéralisation de N. L'année 2014 (+ 4 ans), l'année de différenciation maximale entre les traitements à l'échelle du projet, a été retenue pour (i) analyser les effets des changements de pratiques sur la diversité et la structure des communautés du sol par modélisation des réseaux trophiques (Barnes et al. 2014), et (ii) identifier les variables les plus explicatives de la fonction de minéralisation d'azote mesurée dans la couche 0-5cm de sol.

La minéralisation brute de l'azote était significativement différente entre les traitements ($p < 0.01$) (Figure 2). Comparé au traitement conventionnel (CONV) (1.09 ± 0.24 mg N/kg sol/jour), une plus forte minéralisation a été observée dans la couche 0-5cm des deux traitements avec un travail du sol réduit, RT et RT-RR (1.95 ± 0.73 and 1.75 ± 0.51 mg N/kg/jour respectivement), et dans le sol sous la culture pérenne RR-PER (1.63 ± 0.42 mg N/kg sol/jour). Par contre, une plus faible minéralisation de l'azote a été observée dans les traitements avec des apports réduits en azote minéral, RN et RN-LEG (0.68 ± 0.17 and 0.87 ± 0.09 mg N/kg sol/jour, respectivement).

Figure 2. Minéralisation potentielle de l'azote (mg.kg-1.jour-1) pour les différents traitements dans la couche de sol 0 à 5 cm en mars 2014 (ANOVA, $p < 0.01$)



La méthode Random Forest (RF) a fourni une meilleure prédiction de la minéralisation potentielle de l'azote que la PLS quel que soit le nombre de variables considérées (Figure 3), mais la classification des variables étaient très similaires. Les onze meilleures variables identifiées par la méthode RF étaient C_{sol} , C_{bm} , N_{tot} , MWD, C_{org} , NO_3^- , uréase, glucosidase, le nombre de collemboles, arylsulfatase et pH_{H_2O} . Le carbone soluble, le carbone de la biomasse microbienne et la teneur en azote total étaient les trois principales variables explicatives pour les deux modèles. Ces résultats sont en phase avec la littérature concernant les paramètres liés à la minéralisation de l'azote (Zamman et al., 1999; Bengtsson et al., 2003; Kaneda and Kaneko, 2011). De plus, les paramètres du sol les plus explicatifs sont très liés aux pratiques agricoles comme l'agrégation du sol, la teneur en carbone organique ou encore la biomasse microbienne (Breland and Eltun, 1999; Jongmans et al., 2001; Roger-Estrade et al., 2010; Zhang et al., 2012; Cluzeau et al., 2012). Quant à la faune du sol, les collemboles jouent un rôle clé sur la décomposition des matières organiques et facilite l'activité de minéralisation de la matière organique par les microorganismes (p.ex. bactéries) et les activités enzymatiques affiliées.

L'approche par réseaux trophiques a notamment permis de montrer une différenciation du niveau trophique moyen, plus élevé dans les parcelles avec labour réduit (RT et RT-RR) en 2014. Ce résultat correspond aux attentes. D'une part, les organismes positionnés au haut de la chaîne alimentaire sont généralement plus sensibles aux perturbations du milieu, qui sont atténués avec la réduction du travail du sol, d'autre part, l'augmentation du carbone de la biomasse microbienne favorise des réseaux trophiques plus étendus. Enfin, la différenciation des parcelles agricoles s'est révélée très similaire pour les fonctions du sol et la structure des communautés, reflétant ainsi l'existence d'une association directe ou indirecte.

Conclusion

Le projet SOFIA qui a exploré une large palette de variables biologiques et physico-chimiques montre qu'à l'échelle de l'agrosystème, il est possible de détecter dès +2 ans après la modification des pratiques, des changements significatifs sur les fonctions associées aux transformations de C et N, et après +4 ans, des modifications des réseaux trophiques. Le principal facteur d'influence à cette échelle de temps est le passage d'un labour profond à un labour superficiel, qui conduit à une stratification verticale des compartiments de C et N, de la biomasse microbienne et des flux associés. La réduction du travail du sol conduit alors à une complexification des réseaux trophiques due à l'apparition d'espèces plus sensibles aux perturbations physiques et à la présence de ressources, notamment à la surface du sol. Pour la fonction de minéralisation de l'azote dans la couche de sol 0-5 cm, nos résultats indiquent que le C soluble, le C de la biomasse microbienne et la teneur en N total sont les variables du sol les plus explicatives des variations de minéralisation observées. A l'échelle de 4 années de différenciation, ces variables peuvent être considérées comme les meilleurs indicateurs précoces d'évolution du fonctionnement du sol.

Bibliographie

- Bengtsson, G., Bengtson, P., Mansson, K.F., 2003. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 35:143–154.
- Breland, T.A., Eltun, R., 1999. Soil microbial biomass and mineralization of carbon and nitrogen in ecological, integrated and conventional forage and arable cropping systems. *Biol Fertil Soils*, 30:193–201.
- Breman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45: 5-32.
- Cluzeau, D., Guernion, M., Chaussod, R., Martin-Laurent, F., Villenave, C., Cortet, J., Ruiz-Camacho, N., Pernin, C., MATEILLE, T., Philippot, L., Bellido, A., Rougé, L., Arrouays, D., Bispo, A., Pérès, G., 2012. Integration of biodiversity in soil quality monitoring: baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *Eur J Soil Biol*, 49: 63–72.
- de Ruiter, P.C., Neutel, A.-M., Moore, J.C., 1995. Energetics, patterns of interaction strengths, and stability in real ecosystems. *Science*, 269: 1257-1260.
- IUSS Working Group, 2014. World reference base for soil resources (WRB). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World soil resources report, 106. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 191 p.
- Jongmans, A.G., Pulleman, M.M., Marinissen, J.C.Y., 2011. Soil structure and earthworm activity in a marine silt loam under pasture versus arable land. *Biology and Fertility of Soils*, 33: 279-285.

- Kaneda, S., Kaneko, N., 2011. Influence of Collembola on nitrogen mineralization varies with soil moisture content. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57: 40-49.
- Millenium Ecosystem Assessment (MEA), 2005. *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC, 86 pp.
- Roger-Estrade, J., Anger, C., Bertrand, M., Richard G., 2010. Tillage and soil ecology: Partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 111 (1): 33-40.
- Wold, S., Sjöström, M., Eriksson, L., 2001. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58 (2): 109–130.
- Zaman, M., Di, H. J., Cameron, K. C., Frampton, C. M., 1999. Gross nitrogen mineralization and nitrification rates and their relationships to enzyme activities and the soil microbial biomass in soils treated with dairy shed effluent and ammonium fertilizer at different water potentials. *Biol Fertil Soils*, 29: 178–186.
- Zhang, X., Li, Q., Zhu, A., Liang, W., Zhang, J., Steinberger, Y., 2012. Effects of tillage and residue management on soil nematode communities in North China. *Ecological Indicators*, 13: 75-81.

Remerciements : Le projet SOFIA a été soutenu par l'ANR Agrobiosphère (ANR-11-AGRO-0004), qui a financé les bourses post-doctorales de Joël Amossé et Valérie Coudrain.

Mini CV



Joël Amossé est docteur en écologie des sols (Université de Neuchâtel, Suisse). Dans le cadre de sa thèse, il a notamment travaillé sur la définition d'indicateurs de fonctionnement des sols en milieu urbain. Après un post-doctorat sur le projet SOFIA, à UMR Agronomie (INRA Grignon), sur la question de la bioindication dans les sols cultivés, il est actuellement maître de conférences en science des sols à l'Université de Lausanne (Suisse).



Valérie Coudrain est docteur en écologie des communautés (Université de Berne, Suisse). Dans ses différents projets, elle s'est notamment intéressée aux impacts de la gestion du paysage et des pratiques agricoles sur la biodiversité et les interactions trophiques au sein des communautés d'invertébrés. Elle vient de terminer un post-doctorat sur le projet SOFIA dans l'UMR ECOSYS (INRA Versailles) sur la dynamique de la biodiversité du sol dans un système de grandes cultures.



Sylvie Recous est directrice de recherches à l'INRA, dans l'UMR Fractionnement des Agroressources et Environnement (FARE) à Reims. Son activité de recherche concerne les processus de dégradation des matières organiques dans les sols, et les effets sur les cycles de C, N et S. Elle est animatrice scientifique du RMT Fertilisation & Environnement. Elle coordonne actuellement le projet ANR SOFIA (2011-2016). Contact : sylvie.recous@reims.inra.fr