

## IMPACT DES APPORTS RÉPÉTÉS DE PRODUITS RÉSIDUAIRES ORGANIQUES SUR LA QUALITÉ DES SOLS ET DES CULTURES

### IMPACT OF REPEATED ORGANIC WASTE PRODUCTS APPLICATION ON SOIL AND CROP QUALITY

par Fiona OBRIOT<sup>1</sup>

#### RÉSUMÉ

L'utilisation de PRO (produit résiduaire organique) permet de valoriser la matière organique (MO) des déchets organiques et de substituer en partie des engrais. Ils améliorent les propriétés des sols et certains services écosystémiques associés. Mais, les PRO peuvent apporter des contaminants aux sols, impacter la qualité de l'air (émissions de N réactif) ou encore la qualité de l'eau (lixiviation des NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

La méthode du bilan carbone a été utilisée pour évaluer les effets de cette pratique sur le changement climatique (**Fig. 1**) à partir des résultats d'un essai au champ à l'exception des émissions gazeuses estimées en conditions maximisantes au laboratoire et de données de la littérature pour le procédé de compostage. Les PRO sont moins émetteurs que la fertilisation minérale. Plusieurs postes ont un fort impact sur le bilan : fabrication des engrais, évolution des stocks de C dans les sols et compostage (**Fig. 2**).

Une méthode multicritère a été utilisée pour évaluer la pratique dans son ensemble sur la base des résultats d'un second essai au champ (**Fig. 3**), montrant que sur les 7 indices de qualité créés, l'apport répété de PRO améliore la qualité des sols au regard des engrais minéraux en fonction de la qualité des MO apportées (**Fig. 4**).

#### Abstract

*Application of OWP (organic waste product) in agriculture allows to recycling organic waste in order to upgrade their organic matter (OM) and to partially substitute fertilizers. Through the input of OM, OWP improve physical, biological and chemical soil properties with impacts on ecosystem services provided by soils (MEA, 2005). Nevertheless, OWP can bring contaminants to the soil (pathogens, organic or mineral pollutant), they can impact air quality (ammonia volatilization (NH<sub>3</sub>) and water quality with nitrates leaching (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) and support N<sub>2</sub>O emissions. All these effects depend on OWP characteristics and their management (doses, applications frequencies...). The consideration of climate change was approached by a monocriter assessment as C footprint (**Fig. 1**) derived from life cycle assessment approach (LCA) in the long-term field experimental site located in Colmar (Alsace). Globally, OWP allows to substitute N and are less emitters than mineral fertilizer (especially BIO and FYM compared to mineral fertilizer). Positions may have a greater or lesser impact on the final balance sheet, such as fertilizer production, evolution of soil C stocks during the years considered and composting (**Fig. 2**).*

*To assess the OWP application practice as a whole, a multicriteria assessment (**Fig. 3**) was developed in the long-term field experimental site called QualiAgro (Ile-de-France), showing that of the 7 soil / crop quality indices created, the OWP repeated application improves the quality of the soils compared to mineral fertilizer according to the quality of OM brought by the OWP (**Fig. 4**). These indices make it possible to integrate multiple effects of OWP. The BIO compost revealed the most beneficial results.*

---

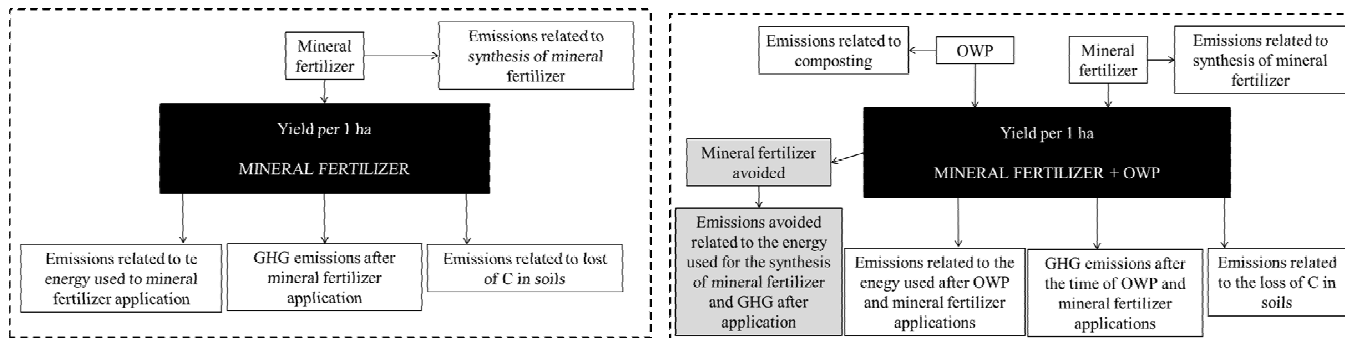
<sup>1</sup> Adresse : 32, rue du 13 octobre 1918, 02000 Laon. Courriel : [fiona.obriot@gmail.com](mailto:fiona.obriot@gmail.com)

Établissement : UMR Ecosys-AgroParisTech, F78850 Thiverval-Grignon

**NOTE DE RECHERCHE**  
Présentée par Jean-Charles Munch

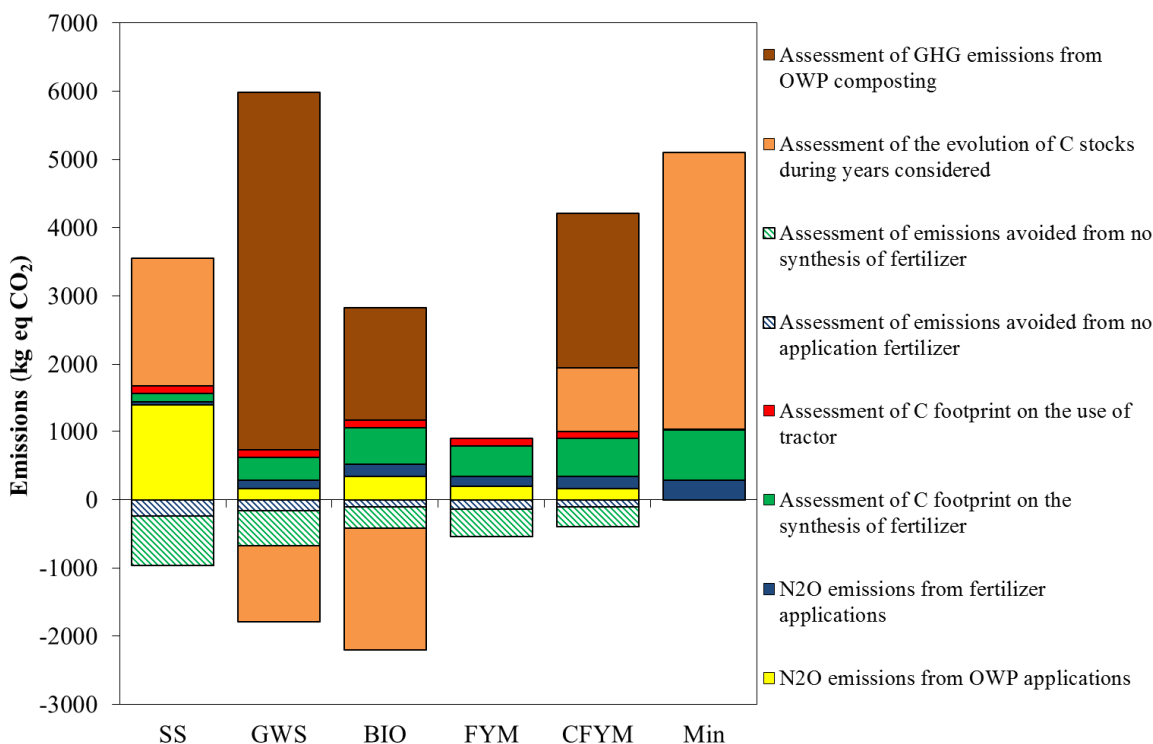
**Limits system:**

- Time limit = 1 campaign of OWP application → 1 application and 2 cultural seasons
- Functional unit = kg eq CO<sub>2</sub>/ha for a constant yield
- Technical = C flux at scale plot



**Figure 1. Schéma du système considéré pour l'évaluation monocritère de la pratique d'épandage : bilan C.**

*Figure 1. Constructed system to determine the C footprint of the use of OWP compared to mineral fertilization. The assessment includes the treatment before OWP application and the mineral fertilizer synthesis.*



**Figure 1. Site de Colmar : bilan C global (compostage + épandage) exprimé en kg eqCO<sub>2</sub>/ha pour l'ensemble des traitements.**

*Figure 2. C footprint for the organic and mineral fertilizations expressed in kg eqCO<sub>2</sub>/ha (site of Colmar).*

**NOTE DE RECHERCHE**  
Présentée par Jean-Charles Munch

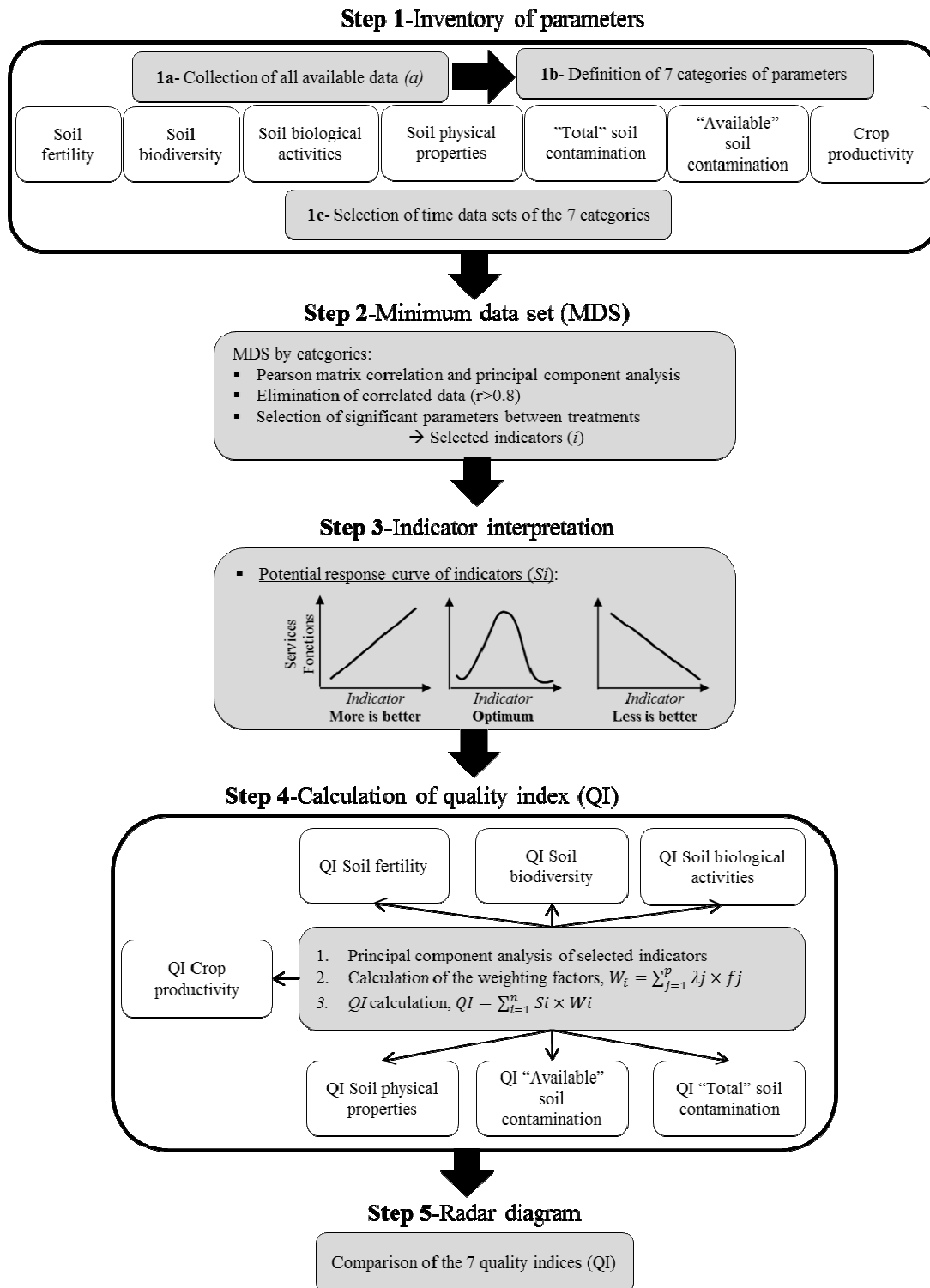


Figure 2. Méthodologie utilisée pour le développement des 7 indices de qualité des sols (QI) (adapté de Andrews, 2004 et Bhardwaj et al. 2011).

$\lambda_j$ = vecteur propre au carré,  $f_j$ =composante principale sélectionnée,  $S_i$ = scores des indicateurs normalisés

Figure 3. Framework used for the development of the 7 quality indices (QI) (adapted from Andrews, 2004 and Bhardwaj et al. 2011).

$\lambda_j$ = squared eigenvectors,  $f_j$ =selected principal component,  $S_i$ =normalized indicator scores

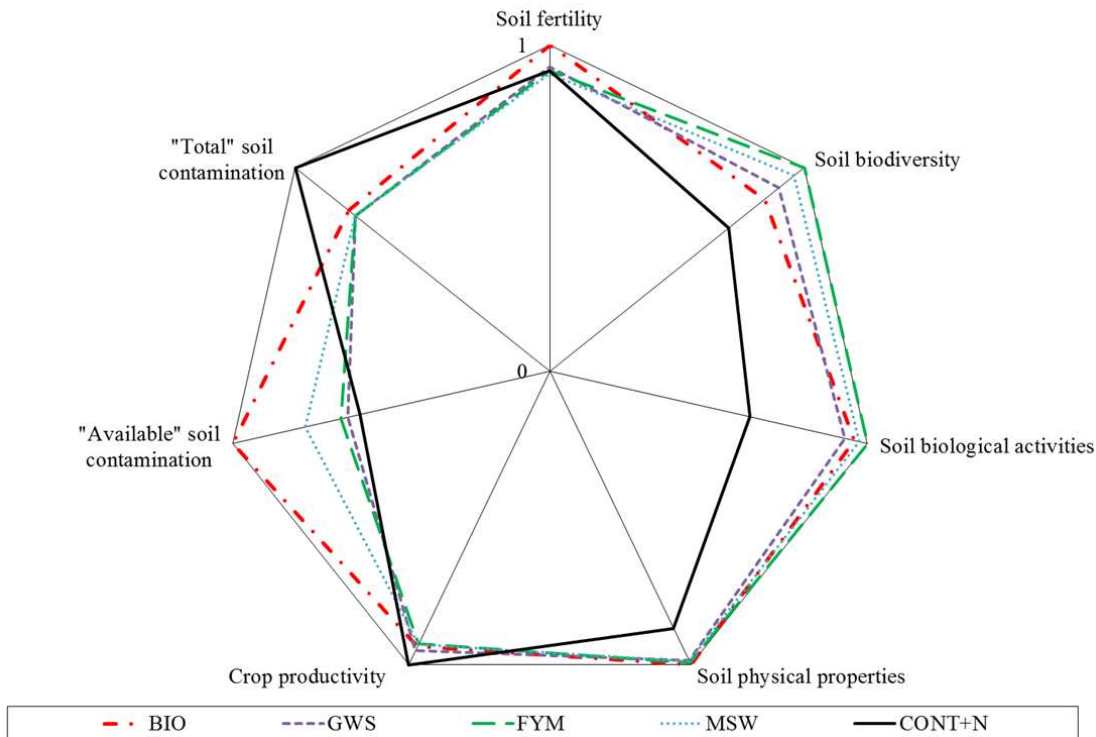


Figure 3. Indices de qualité normalisés (0-1) pour les traitements organiques et le témoin minéral.

Avec BIO = compost de biodéchets (en rouge), GWS = co-compost de déchets verts et de boue (en violet), FYM = fumier bovin (en vert), MSW = compost d'ordures ménagères résiduelles (en bleu), CONT+N = engrais minéral (en noir)

Figure 4. Normalized quality indices (0-1) for the organic treatments and the mineral control.

With BIO = biowaste compost (in red), GWS = co-compost of sewage sludge and green waste (in purple), FYM = farmyard manure (in green), MSW = municipal solid waste compost (in blue), CONT+N = mineral fertilizer (in black)

## Introduction:

Les sols contribuent à un panel de services écosystémiques tels que des services de régulation (stockage de C, filtration de l'eau...), d'approvisionnement (qualité et rendement des cultures) ou de support en tant qu'habitat interagissant des organismes du sol qui dépendent fortement de la gestion et des pratiques agricoles. L'apport de produits résiduels organiques (PRO) est une pratique ancestrale, avec notamment le retour au sol des effluents d'élevage sur les terres cultivées. L'introduction de PRO d'origine urbaine (boues de STEP, ordures ménagères résiduelles) est plus récente. La valorisation des PRO en agriculture s'inscrit dans une logique d'économie circulaire via la valorisation des déchets organiques dans un contexte où les quantités de déchets produites s'accroissent à mesure que la population et les villes grandissent. Les impacts tant positifs que négatifs ont bien souvent été analysés séparément. Des impacts positifs comme l'amélioration de la structure du sol (Annabi *et al.*, 2007), un stockage plus important de C, une augmentation de la disponibilité en nutriments pour les cultures (Bastian et Ryan, 1986) ou une augmentation de la biodiversité fonctionnelle des sols (Bastida *et al.*, 2008; Garcia-Gil *et al.*, 2004) sont aujourd'hui connus. Mais des apports répétés de PRO peuvent aussi conduire à un enrichissement des sols en micropolluants comme les métaux (Carlson *et al.*, 1975). Tous ces effets positifs et négatifs se produisent simultanément et doivent donc être pris en compte pour une évaluation globale de cette pratique. Bien que

L'utilisation des PRO en agriculture permet une production agricole avec moins d'intrants de synthèse, il faut veiller à l'innocuité de cette pratique afin de garantir la durabilité des systèmes agricoles concernés. Ce travail de thèse avait donc pour objectif d'évaluer la pratique d'apports répétés de PRO via des approches *i*) monocritère (bilan carbone) et *ii*) multicritère en développant différents indices de qualité des sols prenant en compte à la fois des impacts positifs et négatifs. Deux essais de longue durée recevant des apports répétés de PRO depuis plus de 10 ans (QualiAgro, 78 et Colmar, 67) ont été utilisés pour évaluer les services écosystémiques rendus.

### **A. Bilan C de la pratique d'épandage**

L'insertion régulière de PRO dans les itinéraires de fertilisation de systèmes de grandes cultures permet d'augmenter les teneurs en matière organique des sols et la disponibilité en N pour les cultures. Cette augmentation de disponibilité en N est liée aux effets directs d'un apport de PRO correspondant à la valeur fertilisante azotée des PRO permettant d'économiser une partie des apports d'engrais azoté synthétique l'année de l'apport des PRO. L'augmentation de la disponibilité de l'N pour les cultures est aussi liée à l'augmentation des stocks de matière organique dans le sol dont la minéralisation augmentera à moyen et long terme le poste de fourniture en azote. Ce second poste de substitution s'observe après plusieurs apports de PRO. Par ailleurs, l'augmentation des teneurs en matière organique dans les sols contribue au stockage du C dans les sols, voie d'atténuation de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES), responsable du changement climatique. Cependant une augmentation des émissions de GES après apport de PRO par rapport à une fertilisation minérale classique peut contrebalancer les effets positifs précédemment cités. Par ailleurs, il faut prendre en compte également, les conséquences de l'insertion de PRO dans les itinéraires techniques des cultures sur les impacts indirects liés à l'augmentation du nombre de passages de tracteurs sur les parcelles amendées (apports d'engrais complémentaire en plus des apports de PRO par exemple, puissance supérieure des tracteurs pour l'épandage).

La méthode du bilan C (ou *C footprint*) permet de quantifier le service de régulation climatique rendu par la pratique d'épandage. Ce bilan C correspond à la composante sur le changement climatique des analyses du cycle de vie (ACV).

Le bilan C a été calculé sur le site expérimental de Colmar mis en place en 2000, où 5 types de PRO (SS : boue de station d'épuration, BIO ; compost de biodéchets, GWS : co-compost de déchets verts et de boue, FYM : fumier bovin, FYMC : compost de fumier bovin) ont été apportés tous les deux ans en début d'année (janvier-février), à une dose de 170 kg N/ha. Nous avons considéré une campagne d'épandage soit deux années culturales : 2011 (betterave) et 2012 (orge). Le système de culture fertilisé avec des engrais minéraux azotés a été comparé aux 5 systèmes recevant des PRO en substitution partielle des engrais minéraux. Tous les systèmes produisent des rendements identiques. Huit postes ont été calculés et exprimés en kg eq CO<sub>2</sub>/ha (**Fig. 1**) : les émissions directes de GES liées aux *i*) apports de PRO et *ii*) d'engrais, *iii*) l'énergie nécessaire à la fabrication des engrais, *iv*) l'énergie dépensée pour apporter et enfouir les PRO ou apporter les engrais, *v*) les émissions directes liées au procédé de compostage (émissions de GES et consommation d'énergie), *vi*) les émissions évitées liées à la non-fabrication des engrais et *vii*) au non-apport d'engrais, *viii*) l'atténuation ou augmentation des émissions liées au stockage ou à la diminution de C dans le sol.

Des mesures des stocks de C dans les sols, de substitution des engrais au champ, des émissions de GES en laboratoire et des références issues de différents rapports et articles scientifiques pour les émissions au cours du compostage ont été utilisées.

Les postes qui semblent les plus émetteurs dans le bilan C sont la fabrication des engrais, le compostage et les conséquences de l'augmentation ou de la diminution des stocks de C (**Fig. 2**). Finalement, le traitement minéral a un bilan global très émetteur avec 5100 kg eq CO<sub>2</sub>/ha contre 4876, 4212, 3556, 1046 et 894 kg eq CO<sub>2</sub>/ha respectivement pour le GWS, FYMC, SS, BIO et FYM (**Fig. 2**). De plus, l'épandage de PRO semble être plus favorable au service de régulation climatique qu'une fertilisation minérale du fait de la capacité des PRO à se substituer à l'engrais et à leur capacité à stocker du C. Cette méthode présente des limites à cause notamment du manque de références concernant les émissions lors du compostage. De plus, d'autres postes n'ont pas été considérés car peu quantifiés comme par exemple les émissions de CH<sub>4</sub> lors du stockage des fumiers qui peuvent être importantes (Gac *et al.* 2007). Enfin, ce bilan devra être amélioré en prenant en considération les émissions de GES mesurées au champ et non estimées au laboratoire. Néanmoins, cette mesure au laboratoire nous a permis de différencier les traitements entre eux alors que les références

préconisées par le GIEC (2006) sont de prendre des facteurs d'émission de 1% du N total émis sous forme de GES quelle que soit la source d'azote. En utilisant ce pourcentage d'émission proposé par le GIEC, le bilan C serait de 6555 kg eq CO<sub>2</sub>/ha pour le traitement minéral contre 6167, 5371, 3926, 2272 et 2260 kg eq CO<sub>2</sub>/ha respectivement pour le GWS, FYMC, SS, FYM et BIO.

### **B. Evaluation multicritère de la pratique d'épandage : 7 fonctions ciblées du sol**

La qualité du sol a été définie par Karlen *et al.* (2003) comme "la capacité du sol à remplir sa fonction". Nous avons, à partir d'une méthode statistique développée par Andrews *et al.* (2004), calculé 7 indices de qualité des sols et des cultures (SQI) en combinant des méthodes utilisant un choix des paramètres « à dire d'experts » et une méthode statistique (Obriot *et al.* 2016) sur le site expérimental de QualiAgro (**Fig. 3**). Ce site (Feucherolles, Ile de France) qui se caractérise par une succession culturale maïs-blé, reçoit, depuis 1998,4 PRO différents tous les 2 ans, à une dose de 4 t C/ha (de 255 à 363 kg N/ha).

L'originalité de cette partie de thèse a été de créer 7 indices différents ciblant la qualité de la récolte, la biodiversité et l'activité biologique du sol, le sol en tant que support physique, la fertilité du sol mais aussi la contamination totale et potentiellement disponible du sol alors que généralement les auteurs travaillent avec un indice unique de qualité du sol. Nous avons comparé l'effet des apports répétés de PRO à une fertilisation minérale.

Les indices sont basés sur une sélection de paramètres mesurés sur le sol et les plantes (cf Obriot *et al.*, 2016). Les indices d'effet peuvent répondre positivement, négativement à la modification d'une propriété de sol ou présenter un optimum de valeur. Ceux-ci ont été considérés comme des indicateurs d'impact s'ils discriminaient les traitements (**Fig. 3**). En cas de corrélation entre paramètres, seul celui le plus couramment utilisé dans un contexte agricole a été conservé. Par exemple, pour qualifier la qualité des récoltes, le rendement, le taux de protéines, la teneur en P, en Ca et en Fe des grains ont été considérés. Pour qualifier le support physique, la stabilité des agrégats, la réserve utile en eau, la masse volumique apparente ont été pris en compte. Ces indicateurs dépendent de la question posée et de l'effet discriminant des traitements entre eux. En aucun cas, les indicateurs retenus ne sont généralisables à toute situation. Les paramètres les plus discriminants ont ensuite été pondérés pour définir les indicateurs de qualité des sols ou des cultures (**Fig. 3**). Sur le site de QualiAgro, les PRO les plus biodégradables comme MSW (compost d'ordures ménagères résiduelles) et FYM (fumier bovin) sont les PRO les plus efficaces pour favoriser la biodiversité des sols. Certains PRO qui se caractérisent par des teneurs plus importantes en phosphore (co-compost de déchets verts et de boue), en potassium (fumier), ou un pH plus élevé (compost de biodéchets et fumier), peuvent être utiles pour améliorer la fertilité des sols. Les modifications du pH du sol peuvent également impacter indirectement la mobilité des éléments traces métalliques dans les sols, et augmenter l'indice correspondant à la contamination disponible dans certains traitements comme BIO (**Fig. 4**).

La représentation de l'ensemble des 7 fonctions ciblées normalisées entre 0 et 1 où 1 représente une meilleure qualité du sol (**Fig. 4**) met en évidence les effets bénéfiques des PRO sur la plupart des indices à l'exception de l'indice de contamination totale. Les traitements organiques se retrouvent en périphérie de la représentation graphique alors que la fertilisation minérale est plus proche du centre de la figure. Le principal moteur de différenciation des traitements entre eux est l'augmentation de la matière organique du sol plus ou moins importante en fonction de la nature des PRO.

Cette approche permet d'évaluer les effets des apports de PRO en ciblant différentes fonctions qui traduisent différents services ou dysservices écosystémiques et de différencier les PRO. La qualité de la matière organique des PRO a conduit à des réponses différentes pour chaque catégorie d'impacts (fertilité des sols, activités biologiques et biodiversité des sols), ce qui peut permettre de développer une démarche de sélection des PRO à utiliser en fonction d'un objectif d'amélioration d'une composante de la qualité des sols, puisque les fonctions sont dissociées les unes des autres.

### **C. Perspectives**

D'autres dysservices écosystémiques comme la qualité de l'air *via* la volatilisation de NH<sub>3</sub>, et la qualité de l'eau *via* la lixiviation de nitrates entre autres devront être considérés dans l'outil multicritère et d'autres contextes pédo-climatiques devront être testés avant de pouvoir généraliser cette approche. Enfin, l'acquisition de références semble rester nécessaire dans les deux méthodes (émissions de GES lors du compostage ou standard

de références pour les indicateurs utilisés dans les indices de qualité des sols) afin de pouvoir développer des outils d'évaluation de la pratique de valorisation des PRO qui pourraient être généralisés à tout type de situation.

### **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- (1) MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. – Ecosystems and human Wellbeing: Synthesis. Island press, Washington, DC, 596p.
- (2) ANNABI M., HOUOT S., FRANCOU F., POITRENAUD M., LE BISSONNAIS Y., 2007. – Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 413–423. doi:10.2136/sssaj2006.0161
- (3) BASTIAN R.K., RYAN J.A., 1986. – Design and management of successful land application systems. *Util. Treat. Dispos. Waste Land* 217–234.
- (4) BASTIDA F., ZSOLNAY A., HERNÁNDEZ T., GARCÍA C., 2008. – Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147, 159–171. doi:10.1016/j.geoderma.2008.08.007
- (5) GARCÍA-GIL J., CEPPI S., VELASCO M., POLO A., SENESI N., 2004. – Long-term effects of amendment with municipal solid waste compost on the elemental and acidic functional group composition and pH-buffer capacity of soil humic acids. *Geoderma* 121, 135–142. doi:10.1016/j.geoderma.2003.11.004
- (6) CARLSON R., BAZZAZ F., ROLFE G., 1975. – Effect of Heavy-Metals on Plants .2. Net Photosynthesis and Transpiration of Whole Corn and Sunflower Plants Treated with Pb, Cd, Ni, and Tl. *Environ. Res. (United States)* 10:1, 113–120. doi:10.1016/0013-9351(75)90077-8
- (7) KARLEN D.L., DITZLER C.A., ANDREWS S.S., 2003. – Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114, 145–156. doi:10.1016/S0016-7061(03)00039-9
- (8) ANDREWS S.S., KARLEN D.L., CAMBARDELLA C.A., 2004. – The Soil Management Assessment Framework. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1945. doi:10.2136/sssaj2004.1945
- (9) OBRIOT F., STAUFFER M., GOUBARD Y., CHEVIRON N., PERES G., EDEN M., REVALLIVER A., VIEUBLE-GONOD L., HOUOT S., 2016. – Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 232, 165-178. doi:10.1016/j.agee.2016.08.004
- (10) GAC A., BÉLINE F., BIOTEAU T., MAGUET K., 2007. – A French inventory of gaseous emissions (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>) from livestock manure management using a mass-flow approach. *Livest. Sci., Recycling of Livestock Manure in a Whole-Farm Perspective* 112, 252–260. doi:10.1016/j.livsci.2007.09.006
- (11) GIEC, 2006. – Volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres, Chapitre 11 : Emission de N<sub>2</sub>O des sols gérés et émission de CO<sub>2</sub> dues au chaulage et à l'application d'urée. Hayama (Japon): IGES Lignes directrices.
- (12) BHARDWAJ A.K., JASROTIA P., HAMILTON S.K., ROBERTSON G.P., 2011. – Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140, 419–429. doi:10.1016/j.agee.2011.01.005