

APPORT DE PRODUITS RÉSIDUAIRES ORGANIQUES

QUELS EFFETS SUR LES SERVICES
ÉCOSYSTÉMIQUES RENDUS PAR LES SOLS ?



Vers



Collembole

Le retour au sol des Produits Résiduaux Organiques (PRO) tels que le fumier, les boues ou les composts est possible lorsque ces PRO présentent un intérêt agronomique lié à l'apport en matière organique (MO) et en éléments nutritifs pour les cultures. La matière organique étant au cœur du fonctionnement du sol, l'épandage de PRO, en modifiant les quantités et la dynamique de la MO, peut avoir un effet sur nombre de services écosystémiques¹ rendus par les sols.

Toutefois, les Produits Résiduaux Organiques (PRO) présentent une grande diversité du fait de leur origine variée (agricole, urbaine, industrielle) et de leur traitement avant épandage (chaulage, compostage, digestion anaérobie, etc.) Ils entraînent donc de grandes différences d'intensité des effets sur l'écosystème. A court terme, sont visibles les effets liés à l'apport d'éléments nutritifs. A moyen et long termes, les effets de l'apport en MO deviennent visibles et étudiables.

Des essais au champ de moyenne et longue durées ont donc permis d'étudier ces effets, leurs dynamiques et leurs interactions sur les services écosystémiques du sol. Ils ont été effectués sur deux sites pilotes : le site QualiAgro depuis 1998 et la plateforme d'essai de Colmar depuis 2000.

10 fiches de synthèse de l'effet des PRO sur les services écosystémiques.
Les "essais au champ" sont détaillés en page centrale de cette brochure (pages 14 - 15)

¹ *Les services écosystémiques* sont les avantages que les humains tirent des écosystèmes. Une liste complète a été dressée dans le Millennium Ecosystem Assessment (2005, *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC)

² *Les dysservices* correspondent aux dysfonctionnements des écosystèmes du point de vue de l'humain.

Dans le cadre de ce projet, les services écosystémiques étudiés sont :

- **Les services d'approvisionnement** via la production agricole.
- **Les services de régulation :**
 - (I) de la qualité des sols, des eaux et des plantes au travers de l'accumulation, la filtration ou la dissipation de contaminants minéraux ou organiques, la résilience d'agents pathogènes dans les sols,
 - (II) des quantités d'eau disponible (infiltration, rétention d'eau),
 - (III) de l'érosion,
 - (IV) du climat via les équilibres stockage de carbone versus émission de gaz à effet de serre, etc.
- **Les services de soutien** tels la stabilité de la structure du sol.

De plus, pour assurer la pérennité de la pratique du retour au sol des PRO, il est nécessaire de s'assurer de l'innocuité des PRO et de considérer les dysservices² qu'ils pourraient générer dans l'évaluation globale de la pratique.

SOMMAIRE

**Apport de
Produits Résiduaire
Organiques**

**Service de soutien :
Stabilité de la
structure du sol
..... p.10**

**Service
d'approvisionnement :
Maintien et augmentation
des rendements p. 4**

**Service
d'approvisionnement :
Disponibilité de l'azote pour
les plantes, substitution des
engrais minéraux p. 6**

**Biodiversité :
Effet des PRO sur l'abondance
et les activités de la microflore
du sol p. 16
Effet des apports de PRO sur
l'abondance et la diversité des
vers de terre p. 18**

**Régulation de la qualité sanitaire :
Transfert de pathogènes humains et de
gènes de résistance aux antibiotiques
..... p.24**

**Régulation de la qualité du sol et
de la quantité sanitaire :
Les éléments traces
métalliques p.20
Transfert de polluants organiques
à la couche superficielle du sol
..... p.22**

**Régulation du climat :
Stockage de carbone
organique p.8**

**Service de régulation de l'eau :
Infiltration et rétention de
l'eau au champ p. 12**

MAINTIEN ET AUGMENTATION DES RENDEMENTS

Un des premiers résultats attendus de l'apport régulier de PRO est de permettre un maintien, voire une augmentation des rendements des productions agricoles.

Sur le site QualiAgro, les rendements moyens sont de 80 à 100 qx/ha pour le blé et 100 à 120 qx/ha pour le maïs (15% d'humidité) dans les parcelles recevant une complémentation minérale avec ou sans apport de PRO (voir p.14).

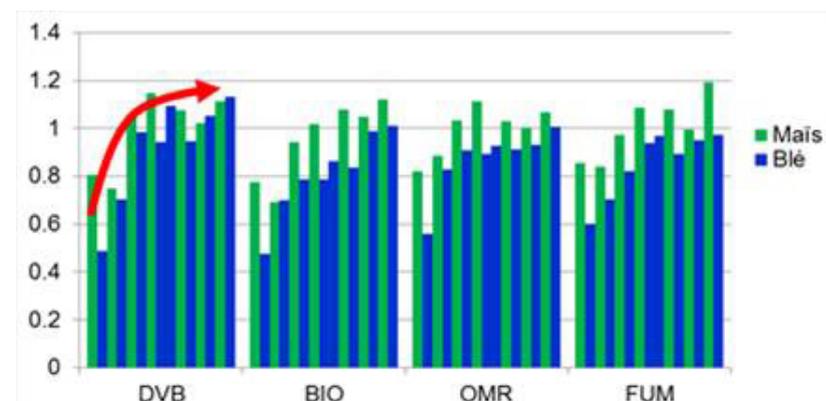


Figure 2 : Rendements relatifs (rendements dans les traitements avec PRO et sans N minéral/rendements dans les traitements avec engrais N minéral seul) des cultures de maïs (en vert) et blé (en bleu) qui se succèdent au cours des années dans le dispositif QualiAgro (de 1999 à 2013)

La figure 2 illustre la capacité des apports de PRO à atteindre des rendements similaires à une fertilisation minérale et son évolution dans le temps. Si les rendements relatifs sont supérieurs à 1, cela signifie que les apports permettent de dépasser les rendements obtenus avec des engrais minéraux.

Durant les premières années de l'essai, les apports de PRO ne permettent pas d'atteindre des rendements similaires à ceux obtenus avec des engrais minéraux (rendements relatifs <1). Toutefois, après 3 ou 4 épandages (5-7 ans), les rendements du maïs (en vert) atteignent les mêmes niveaux dans les parcelles ayant reçu des PRO seulement que celles ayant reçu uniquement une fertilisation minérale (parcelles témoins, TEM).

La culture de maïs ayant lieu après les épandages de PRO, elle bénéficie pleinement de la fraction facilement disponible de l'azote (N). Les rendements relatifs dépassent 1 dans toutes les parcelles ayant reçues des PRO. Cet effet sur les rendements est essentiellement dû à l'augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs suite aux apports de PRO, en particulier de l'azote.

Pour le blé (en bleu), les rendements relatifs dépassent 1 dans le cas du compost de boue (DVB) après 5 épandages. Les éléments nutritifs du compost de boue sont plus biodisponibles que dans les autres PRO. Il faut attendre le 7ème épandage dans les autres traitements pour que le rendement relatif soit supérieur à 1. La disponibilité de l'azote étant moindre deux ans après un apport, la culture de blé ne bénéficie pas de la même quantité d'azote disponible que la culture de maïs. Ce qui peut expliquer la différence de rendement relatif obtenue.

Les apports de PRO se substituent en partie aux engrais minéraux classiques (voir p.6).

Enfin, il est à noter que dans les traitements organiques, un palier tend à être atteint dans l'augmentation des rendements, témoignant d'un «équilibre de fertilité» atteint en présence des PRO.



À retenir

Une fertilisation par apports répétés de PRO peut permettre d'atteindre des rendements équivalents voire supérieurs aux rendements atteints avec une fertilisation azotée minérale seule, si les augmentations des teneurs en matière organique du sol sont suffisamment importantes.

Pour le maïs cultivé après l'épandage, il est possible de se passer totalement d'engrais minéral au bout de quelques années d'épandage de PRO.

SERVICE D'APPROVISIONNEMENT

DISPONIBILITÉ DE L'AZOTE (N)

POUR LES PLANTES,

SUBSTITUTION DES ENGRAIS

MINÉRAUX

Les PRO peuvent se substituer partiellement aux engrais minéraux azotés apportés aux cultures. Lors de la saison culturale, les PRO contribuent à la fourniture en azote (N) aux plantes via leur teneur en N minéral et par l'intensité de la minéralisation à court terme du N organique. A plus long terme, ils contribuent aussi à la fourniture en N, via la minéralisation de la MO augmentée des sols.

Sur les sites de QualiAgro et Colmar (voir p.14 et 15), les PRO étudiés ont une teneur en N total comprise entre 4 et 20 kg d'azote (N) par tonne de matière brute dont 4 à 68% sont facilement disponibles dans l'année après l'apport (N minéral initial + N organique minéralisé). Notamment, pour une tonne de boue apportée, 8 kg de N seront disponibles

pour la culture. La boue se distingue des autres PRO par sa minéralisation rapide après l'épandage. C'est un PRO fertilisant (Figure 3).

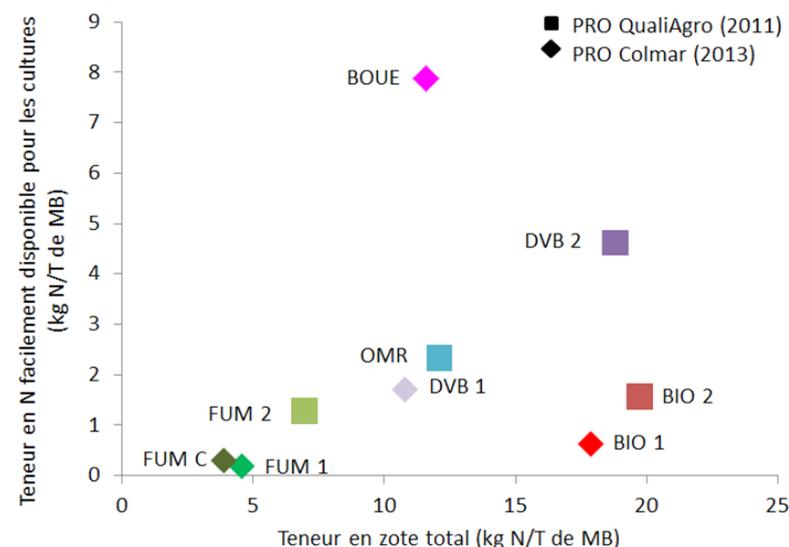


Figure 3 : Relation entre les teneurs en azote total et en azote facilement disponible pour les cultures pour les PRO utilisés sur les sites de Colmar (1) et de QualiAgro (2)

A plus long terme, après plusieurs épandages, la fourniture en azote (N) via la minéralisation de la MO du sol est comprise entre 17 et 66 kg N/ha respectivement pour le DVB et le fumier utilisé à Colmar. Elle varie de 56 à 106 kg N/ha respectivement dans les traitements OMR et BIO sur le site QualiAgro, en lien avec les fortes augmentations de MO (Figure 4). A Colmar, la boue, très fertilisante maintient une disponibilité en N plus importante sur le long terme.

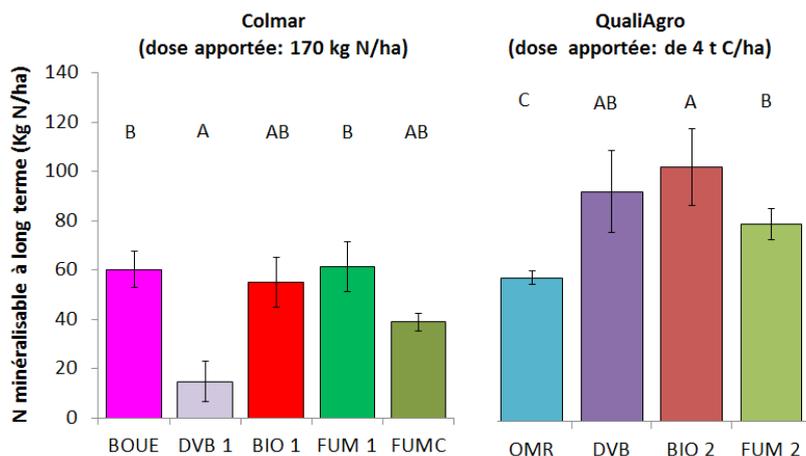


Figure 4 : Augmentation du N potentiellement disponible* (en kg N/ha) par rapport aux traitements témoin après 6 et 7 épandages de PRO dans les sites de Colmar et QualiAgro

Toutefois, il y a des impacts environnementaux liés à la valeur fertilisante des PRO :

- L'azote (N) minéral ammoniacal peut se volatiliser. Des émissions de N_2O peuvent suivre l'apport de PRO. Néanmoins des mesures en laboratoire montrent des facteurs d'émission de N_2O très faibles entre 0,2 et 0,8% du N total apporté.
- La mauvaise maîtrise de la disponibilité de l'azote, par rapport aux prélèvements par les plantes, peut entraîner un risque de lixiviation des nitrates en excès dans le sol.
- Les PRO apportent en même temps différents éléments nutritifs ; il faut donc veiller à l'équilibre des éléments (N et P en particulier) pour éviter les risques d'excès dans les sols, pouvant avoir des impacts potentiels sur la qualité des eaux.

À retenir

Les apports de PRO peuvent se substituer partiellement aux engrais minéraux azotés :

- A court terme, cette fourniture en azote (N) pour les plantes dépend des teneurs en N minéral et de la vitesse de minéralisation du N organique des PRO. Certains PRO, comme la boue, peuvent être utilisés comme fertilisant organique.
- A plus long terme, l'augmentation de la MO des sols, générée par les PRO amendants contribue également à la substitution des engrais minéraux azotés.

* **Traitement statistique** : les lettres différentes (A, B, C) indiquent que les effets des différents traitements sont significativement différents.

SERVICE DE RÉGULATION DU CLIMAT

STOCKAGE DE CARBONE

ORGANIQUE (C)

Les apports de PRO contribuent à l'augmentation des stocks de carbone organique (C) dans les sols. Ils n'ont pas tous la même capacité de stockage de carbone qui dépend des caractéristiques de leur MO.

Dans le site QualiAgro (voir p.14), les doses d'apport des PRO sont calculées pour apporter 4 tonnes de C par hectare, ce qui correspond à des doses de 20 à 30 t MB/ha à chaque épandage, soit 2 à 3 fois la dose classique d'apport d'amendements organiques pratiquée par les agriculteurs. Ces apports conséquents ont généré des augmentations significatives des stocks de C dans les sols.

Alors que les stocks de C restent constants dans le traitement témoin, ces augmentations ne sont pas équivalentes dans les différents traitements avec apport de PRO (Figure 5).

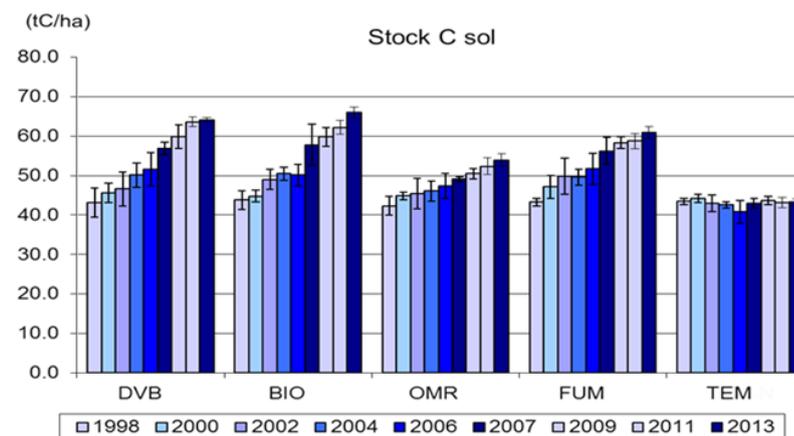


Figure 5 : Evolution des stocks de C dans les traitements organiques et témoins du site QualiAgro de 1998 à 2013 (parcelles avec engrais minéral)

On peut calculer un rendement en carbone stocké associé aux différents PRO comme étant le rapport entre la différence de stocks de C dans les traitements amendés et témoin, et la quantité de C apportée via les PRO (Tableau 1).



PRO	Rendement en C stocké (en $t C_{sol} / t C_{PRO}$)
OMR	0,36
FUM	0,54
DVB	0,60
BIO	0,77

Tableau 1. Rendements moyens entre 1998 et 2013 en carbone stocké dans les sols amendés de l'essai QualiAgro

Les PRO les plus efficaces sont ceux qui sont caractérisés par les MO les plus stables (compost de biodéchets, BIO, et compost de boue et déchets verts, DVB, dans le cas de l'essai QualiAgro).

En revanche, sur le site de Colmar (voir p.15), les apports de PRO, calculés pour apporter des doses d'azote conformes aux pratiques (170 kg N/ha), ont très peu d'effet sur les stocks de C dans les sols.

Ces augmentations de MO dans les sols vont expliquer de nombreux effets observés différenciant les différents traitements.

Par ailleurs, pour effectuer un bilan carbone complet de la pratique et conclure à un effet positif de l'apport des PRO en tant que "puit de carbone" dans les sols, les émissions de gaz à effet de serre générées par la pratique de l'apport de PRO doivent être prises en compte. Ces émissions de gaz à effet de serre pourraient compenser le stockage de carbone observé dans les sols et neutraliser le bilan carbone de la pratique.

À retenir

Les apports de PRO augmentent le stock de carbone organique du sol avec une efficacité différente selon le type de PRO (faible pour le compost d'OMR et la boue d'épuration - maximale pour le compost de biodéchets).

L'effet "puit de carbone" de l'apport de PRO est à relativiser à la lumière du bilan incluant les émissions de gaz à effet de serre de cette pratique en comparaison avec la fertilisation minérale.

SERVICE DE SOUTIEN

STABILITÉ DE LA

STRUCTURE DU SOL

La structure du sol conditionne sa porosité, permettant aux racines de s'ancrer dans celui-ci, et à l'eau et aux gaz de circuler pour en assurer l'oxygénation. La stabilité de la structure est l'aptitude des agrégats du sol à résister à l'action désagrégante de l'eau lors de pluies.

Cette propriété est un bon indicateur de la sensibilité des sols à la battance³ et donc à l'érosion. La battance génère l'asphyxie du sol et peut empêcher la germination. L'érosion entraîne des pertes de sol, donc de fertilité, et génère des impacts sur l'environnement comme l'entraînement de particules dans les eaux superficielles, la formation de coulées boueuses...

Dans les sols limoneux décarbonatés, comme ceux du site QualiAgro (voir p.14), les stocks de MO et l'activité biologique sont les deux déterminants de la stabilité de la structure. La stabilité de la structure a été mesurée de 1999 à 2007 dans le site QualiAgro selon la méthode Afnor (norme X31-515). Les résultats sont exprimés en taille

moyenne d'agrégats, après différents tests désagrégants. Les variations interannuelles liées au climat des résultats obtenus rendent nécessaires de les exprimer relativement au traitement témoin sans apport organique.

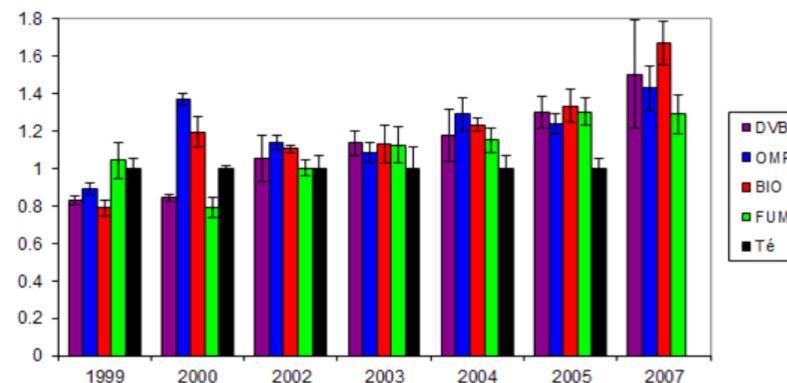


Figure 6 : Evolution de la stabilité de la structure dans les sols recevant les PRO exprimée relativement aux résultats du sol témoin sans apport organique sur le site de QualiAgro entre 1999 et 2007 (Annabi et al., 2011)

Les apports répétés des PRO génèrent une amélioration progressive de la stabilité de la structure dans les traitements organiques (Figure 6). Cette amélioration est corrélée à l'augmentation des teneurs en MO dans les traitements amendés.

³ **Battance** : Défaut d'un sol qui, par dégradation de sa structure grumeleuse et de sa porosité sous l'action de la pluie, présente une induration (ou glaçage) superficielle.

RÉSISTANCE À LA PÉNÉTRATION

Cette propriété est mesurée par la pression exercée lors de l'enfoncement d'un cône de pénétromètre dans le sol. Plus elle est importante, plus il faudra d'énergie pour travailler le sol.

Sur le site QualiAgro, la semelle de labour est légèrement plus épaisse et plus tassée dans les parcelles recevant des traitements organiques, sans doute en raison du trafic d'engins supplémentaires liés à l'épandage. Cependant, au sein de la couche labourée, la résistance à la pénétration est plus faible dans les parcelles amendées que dans les parcelles témoins indiquant moins de compaction et une structure plus ouverte (Figure 7).

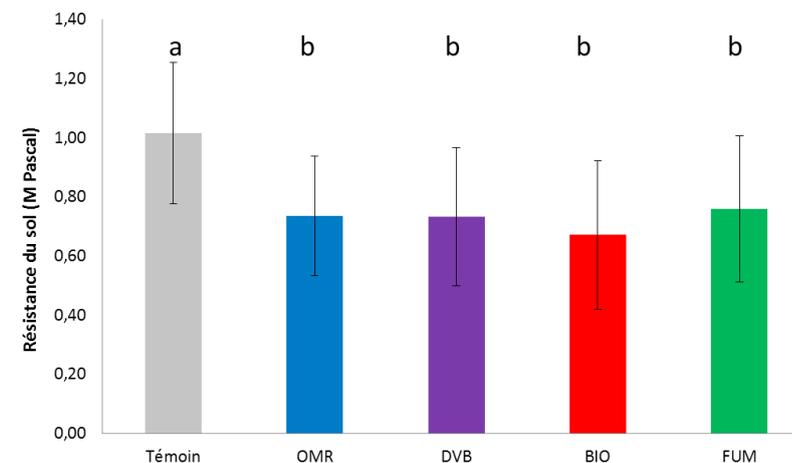


Figure 7 : Résistance moyenne à la pénétration dans la couche labourée (0-20 cm) des différents traitements* de l'essai QualiAgro.

À retenir

Les apports de PRO successifs entraînent une augmentation progressive de la stabilité structurale ainsi qu'une plus faible résistance à la pénétration du sol.

La teneur élevée en matière organique des sols amendés conduit à une plus grande fertilité physique de ces sols.

* **Traitement statistique** : les lettres différentes (A, B, C) indiquent que les effets des différents traitements sont significativement différents.

SERVICE DE RÉGULATION DE L'EAU

INFILTRATION ET RÉTENTION DE L'EAU AU CHAMP

L'infiltration et la rétention de l'eau correspondent à la capacité d'un sol agricole à réguler la quantité d'eau pouvant être absorbée et retenue dans les horizons supérieurs du sol. Elle permet notamment de réduire l'irrigation. La capacité d'un sol à réguler la vitesse d'infiltration des excès d'eau contribue à limiter les risques d'érosion ou d'anoxie. La matière organique joue un rôle important dans ces deux propriétés du sol.

La mesure de la vitesse d'infiltration est un bon indicateur de cette capacité de régulation. Elle se mesure par la méthode du double cylindre et correspond au volume d'eau capable de s'infiltrer dans le sol en condition saturée, en un temps donné (exprimé en mm/h).

L'infiltration est également liée au volume des pores du sol, au sein desquels l'eau peut s'infiltrer et être retenue. Le volume poral du sol est estimé par le volume d'eau nécessaire pour saturer le sol (exprimé en mm).

Ces deux propriétés ont été mesurées sur le site QualiAgro (voir p.14) pour les trois traitements organiques suivants OMR, BIO et FUM et pour le traitement témoin sans apport (TEM).

La vitesse d'infiltration de l'eau à l'équilibre est plus importante pour les sols amendés des traitements BIO et FUM que pour le sol du traitement témoin. L'effet du traitement compost OMR n'est pas significativement différent du témoin (Figure 9). Par ailleurs, le volume poral tend à être plus important pour les parcelles amendées que pour les parcelles témoins. A noter qu'il est maximal dans le traitement OMR (Figure 10).



Figure 8 : Mesure de vitesse d'infiltration par la méthode du double cylindre

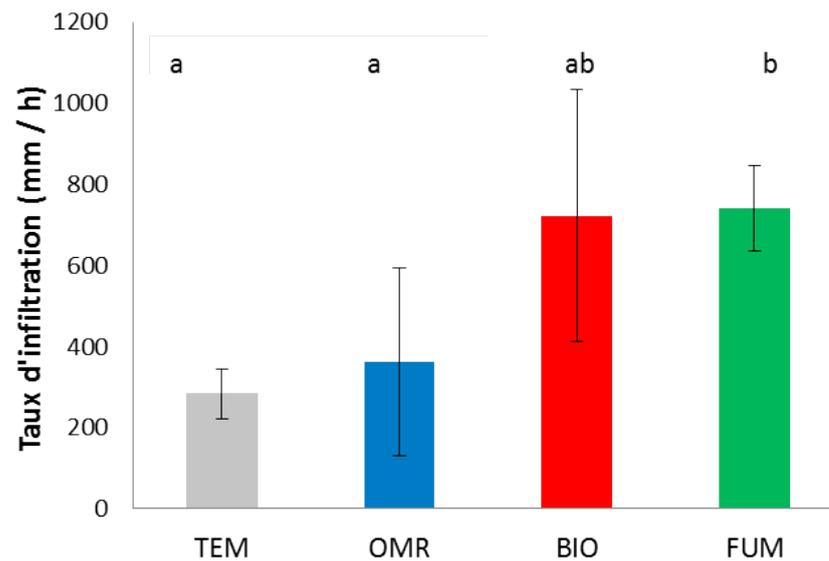


Figure 9 : Vitesse d'infiltration de l'eau dans 4 traitements témoin et amendés du site QualiAgro*

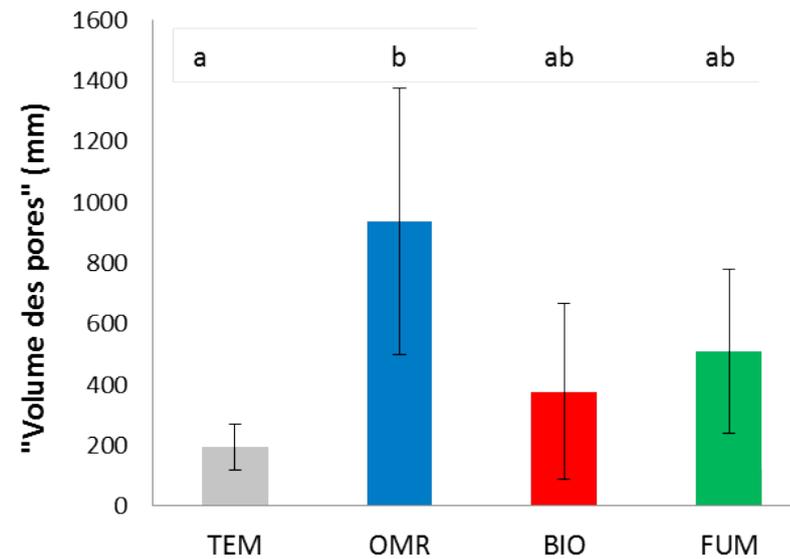


Figure 10 : Volume poral du profil de sol dans 4 traitements témoin et amendés du site QualiAgro, représenté par la quantité d'eau nécessaire à la saturation du profil de sol*

À retenir

La teneur plus importante en matière organique (MO) des sols amendés se traduit par une capacité supérieure de rétention d'eau et une vitesse d'infiltration de l'eau excédentaire plus rapide.

L'apport d'amendement organique permet une meilleure régulation de l'eau au champ.

* **Traitement statistique** : les lettres différentes (A, B, C) indiquent que les effets des différents traitements sont significativement différents.

DISPOSITIF QUALIAGRO



Le site QualiAgro est un essai au champ de moyenne/longue durée, initié en 1998 dans le cadre d'une coopération INRA - Veolia Recherche & Innovation. Le site QualiAgro est un des sites du SOERE PRO (Système d'Observations et d'Expérimentations pour la Recherche en Environnement sur les Produits Résiduels Organiques), réseau d'essais au champ dédiés à l'étude des effets des épandages répétés de PRO.

Description du site :

Localisation : Les Yvelines (78) sur le plateau des Alluets-le-Roi à 30 km à l'ouest de Paris.

Climat : de type océanique dégradé, avec une température moyenne de 11°C et une pluviométrie de 600 mm environ.

Type de sol : luvisol sur lœss (sol limono-argileux décarbonaté jusqu'à 1 m de profondeur, pH 6,9 en surface) représentatif du Bassin Parisien.

Surface : 6 hectares segmentés en 4 blocs de répétition de traitement sur 10 parcelles de 450 m².

Objectif de l'essai :

L'objectif de cet essai est de comparer les effets d'apports répétés de différents PRO sur les composantes d'un agrosystème (sol, plantes, eau, air). Les effets de 4 amendements organiques y sont étudiés et comparés à des traitements témoins (**TEM**) sans apport organique :

1. Un compost de biodéchets (**BIO**), issu d'une collecte sélective de la fraction fermentescible des ordures ménagères co-compostée avec des déchets verts
2. Un compost d'ordures ménagères résiduelles (**OMR**), issu du compostage des ordures ménagères résiduelles après tri amont des emballages (papier-carton, plastique, verre)
3. Un compost de boue (**DVB**), issu du compostage de boue d'épuration en mélange avec des déchets verts
4. Un fumier de bovins laitiers (**FUM**)

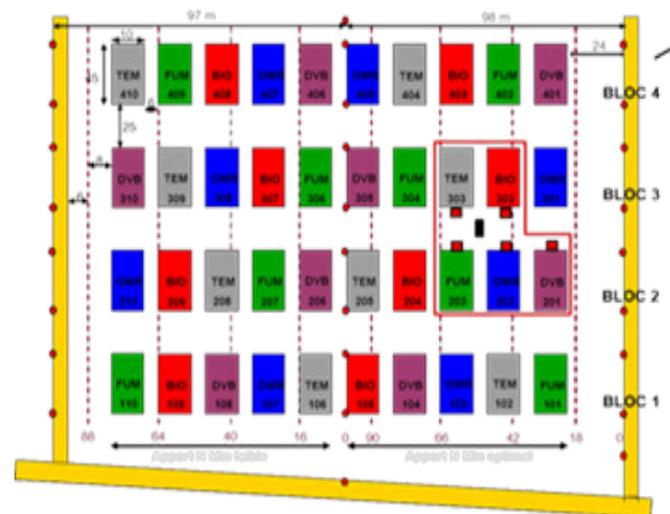


Figure 11 : Plan du dispositif QualiAgro

Conduite de l'essai :

La succession de culture est simple : blé-maïs avec exportation des pailles de blé et restitution des résidus de maïs.

Les apports de PRO sont effectués tous les 2 ans depuis 1998 sur chaumes de blé à hauteur de 4 t C/ ha.

L'essai est divisé en 2 sous-essais :

- Une moitié reçoit une fertilisation minérale azotée optimale en complément des PRO (noté +N) ;
- L'autre moitié reçoit une fertilisation minérale minimale (moitié ou ¼ de la fertilisation optimale sur blé uniquement, noté -N).

De plus, cinq parcelles sont équipées de capteurs pour mesurer les teneurs en eau et potentiels hydriques, la température sur l'ensemble du profil de sol. Dans ces 5 parcelles, se trouvent également 2 niveaux de plaques lysimétriques à 45 et 100 cm de profondeur pour collecter les eaux du sol pour analyses.

Plus d'informations sont disponibles sur <http://www6.inra.fr/qualiagro>

LA PLATEFORME DE COLMAR

La plateforme de Colmar a été initiée en collaboration avec le SMRA (Syndicat Mixte pour le Recyclage Agricole du Haut-Rhin) et l'ARAA (Association pour la relance agronomique en Alsace) en 2000. Elle est également un site du SOERE PRO localisé au sein de l'Unité expérimentale de l'INRA de Colmar en Alsace.

Description du site :

Localisation : Colmar

Climat : de type continental avec une température moyenne annuelle de 10,5°C et une pluviométrie de 560 mm.

Type de sol : calcosol limoneux issu de loëss, caractéristique de la plaine d'Alsace. Il est carbonaté sur toute la hauteur du profil (1 m de profondeur environ).

Surface : 2,26 hectares segmentés en 4 blocs de répétition des traitements sur 12 parcelles de 90 m². Un bloc supplémentaire comprend 6 parcelles maintenues nues de différents traitements et 6 parcelles constituant les traitements «zéro N adjacents».

Objectif de l'essai :

L'objectif de cet essai est de comparer les effets d'apports répétés de différents PRO sur les composantes d'un agrosystème (sol, plantes, eau, air). Les effets de 5 amendements organiques y sont étudiés et comparés à des traitements témoins (TEM) sans apport organique :

1. Des boues d'épuration urbaine (BOUE)
2. Les mêmes boues compostées avec des déchets verts (DVB)
3. Un compost de biodéchets (BIO)
4. Un fumier de bovins (FUM)
5. Un fumier de bovins composté (FUMC)

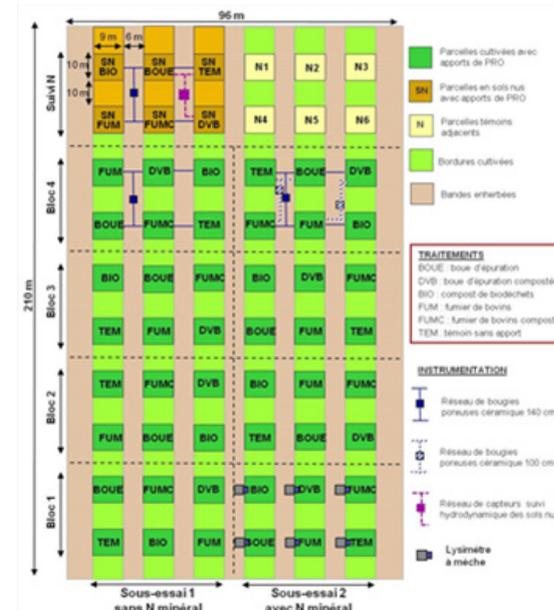


Figure 12 : Plan de la plateforme de Colmar

Conduite de l'essai :

La succession de culture est représentative de la plaine d'Alsace ; maïs, blé, betterave, orge avec restitution de tous les résidus de culture. Les PRO sont apportés tous les 2 ans avant maïs ou betterave en début d'année. Les doses d'apport sont calculées pour apporter 170 kg N/ha. Les épandages sont faits manuellement.

L'essai est divisé en 2 sous-essais :

- Le premier reçoit uniquement les PRO
- Le second est complété en engrais minéral azoté dont les doses sont calculées en fonction des besoins des plantes.

BIODIVERSITÉ

EFFET DES PRO SUR

L'ABONDANCE ET LES ACTIVITÉS

DE LA MICROFLORE DU SOL

Les apports de PRO, grâce à l'apport de MO, stimulent l'abondance, la diversité et les activités des microorganismes du sol, impliqués dans de nombreux services écosystémiques :

- la disponibilité d'éléments nutritifs pour les plantes *via* la minéralisation du N organique,
- la protection des cultures *via* par exemple les antagonismes avec les pathogènes,
- la lutte contre l'érosion *via* la stabilité de la structure,
- la décontamination des sols et des eaux *via* la dégradation des micropolluants organiques.

L'intensité et la persistance des effets des PRO sur la microflore dépendent de la quantité et de la fréquence des apports, des caractéristiques de la MO des PRO liées à leur origine et aux traitements appliqués, et des conditions pédoclimatiques.

Sur le site QualiAgro (voir p.14), les apports réguliers de composts et de fumier augmentent progressivement les teneurs en MO des sols (voir p.4). Ceci a pour conséquence d'augmenter d'un facteur 1,4 la biomasse microbienne totale de façon similaire dans tous les traitements organiques après 7 apports (Figure 13).

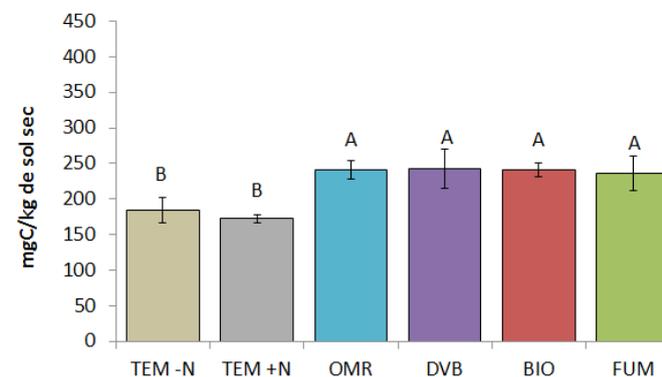


Figure 13 : Effet à long terme* (après 7 épandages, QualiAgro) des apports de PRO sur la biomasse microbienne totale

A plus court terme, dans les semaines qui suivent l'apport des PRO, les effets sur les microorganismes du sol sont plus intenses et se différencient entre les traitements organiques. En effet, la biomasse microbienne totale augmente d'un facteur compris entre 1,2 et 1,9 juste après le 8ème épandage (Figure 14).

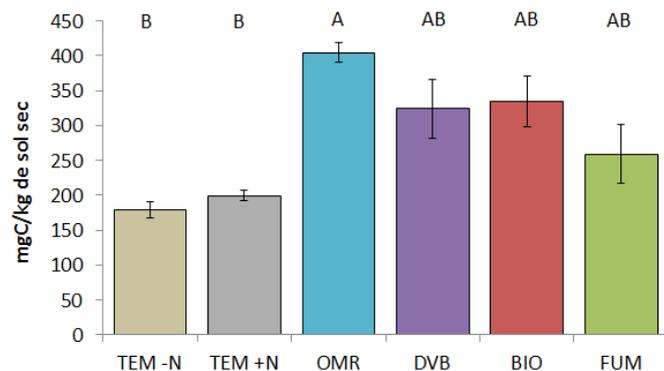


Figure 14 : Effet à court terme (3 semaines après le 8ème épandage, QualiAgro) des apports de PRO sur la biomasse microbienne totale*

Le PRO le plus efficace est le compost d'ordures ménagères résiduelles (OMR), riche en C facilement biodégradable et directement assimilable par les microorganismes, avec un effet significatif très marqué sur la microflore fongique.

A noter : des microorganismes plus spécifiques tels que les bactéries nitrifiantes, responsables de la transformation de l'ammonium en nitrates, sont significativement stimulés juste après épandage dans la parcelle amendée avec le

compost de boue (DVB, Figure 15), sans doute en raison de ses teneurs importantes en ammonium. Les apports de PRO n'ont aucun effet sur les populations dénitrifiantes, à l'origine de la réduction des nitrates en N_2O puis N_2 en conditions d'anaérobiose.

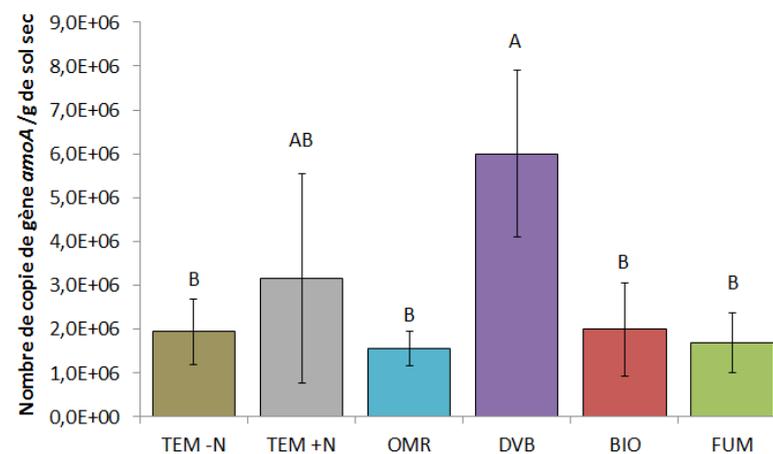


Figure 15 : Effets à court terme des apports de PRO sur l'abondance des bactéries nitrifiantes* (3 semaines après le 8ème épandage, site QualiAgro)

Sur le site de Colmar où les apports en matière organique par les PRO sont beaucoup plus faibles, aucune stimulation de la microflore du sol n'a été observée ni à court terme ni à long terme.

À retenir

Les PRO stimulent la biomasse microbienne du sol rapidement après épandage et les effets persistent à moyen-long terme.

* **Traitement statistique :** les lettres différentes (A, B, C) indiquent que les effets des différents traitements sont significativement différents.

BIODIVERSITÉ

EFFET DES APPORTS DE PRO SUR L'ABONDANCE ET LA DIVERSITÉ DES VERS DE TERRE

Les vers de terre sont considérés comme les «ingénieurs» du sol. Leur activité permet l'enfouissement des résidus végétaux dans le profil de sol et leur mélange avec les matrices minérales des sols. Les galeries associées à l'activité des lombrics participent à la porosité du sol et favorisent la pénétration et la circulation de l'eau dans le sol.

Sur le site QualiAgro (voir p.14), après 7 épandages, le nombre de vers de terre est augmenté par les apports successifs de PRO. L'intensité d'augmentation n'est pas en lien avec l'augmentation de MO dans les sols. En effet, elle est plus importante dans le traitement Fumier alors que les teneurs en MO les plus importantes observées sont dans les traitements DVB et BIO (Figure 16a). Les apports de PRO modifient également la distribution des types de lombrics avec une augmentation des anéciques par rapport au traitement témoin (Figure 16b).

La faible diversité lombricienne obtenue sur le site QualiAgro peut être imputée aux usages et pratiques agricoles mises en œuvre sur ce site «grandes cultures». Les parcelles témoin contiennent moins de vers anéciques⁴ (*L. terrestris*) que tous les autres traitements, espèce favorisée par les amendements. En effet, *L. terrestris* qui se nourrit de matières peu dégradées en surface semble être plus sensible aux apports organiques par rapport à l'espèce endogée (*N. caliginosus*) qui se nourrit plutôt de matières organiques déjà évoluées et prélevées dans le sol.



⁴Les anéciques sont une catégorie écologique de vers de terre regroupant des espèces pigmentées, de grandes tailles, vivant dans des galeries généralement verticales et permanentes et se nourrissent de matière organique essentiellement en surface.

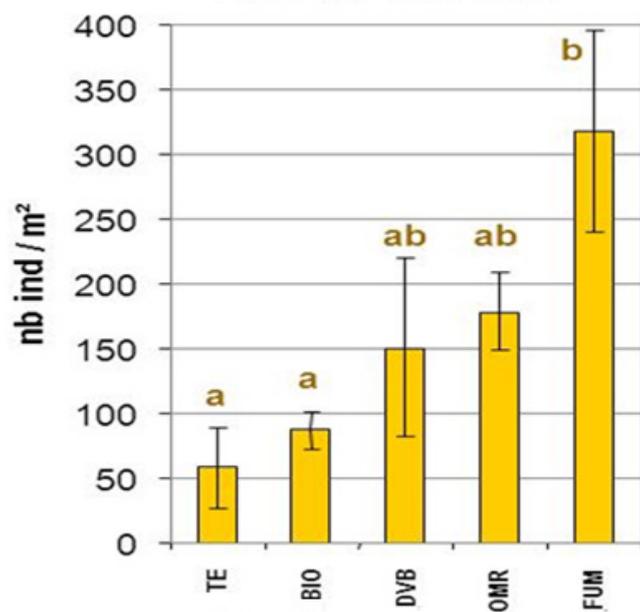


Figure 16 a : Effet d'apports répétés de PRO* sur l'abondance des lombrics dans l'horizon de labour (Peres et al., 2011 dans le cadre du programme ADEME Bioindicateurs)

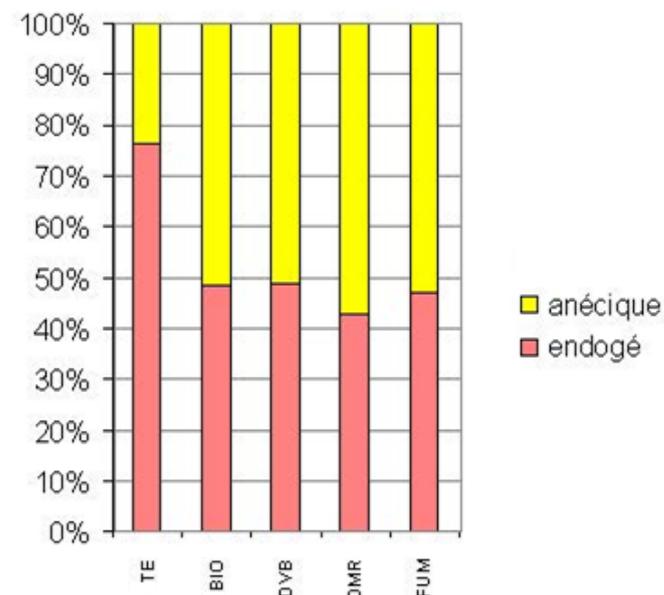


Figure 16 b : La distribution des lombrics au sein des principales familles de lombrics (Peres et al., 2011 dans le cadre du programme ADEME Bioindicateurs)

À retenir

En contexte agricole où les lombrics sont peu nombreux, les apports répétés de PRO augmentent la densité de vers de terre et la proportion de vers anéciques qui favorisent l'incorporation de la MO des PRO à celle du sol et l'augmentation de la macroporosité dans le sol via le creusement de galeries.

Note : Résultats obtenus dans le cadre du programme ADEME "Bioindicateurs" sur le site QualiAgro au printemps 2009. Pour en savoir plus : G. Pérès, F. Vandembulcke, M. Guernion, M. Hedde, T. Beguiristain, F. Douay, S. Houot, D. Piron, L. Rougé, A. Bispo, C. Grand, L. Galsomies, D. Cluzeau. The use of earthworms as tool for soil monitoring, characterization and risk assessment. Example of a Bioindicator Programme developed at National scale (France). 2012. *Pedobiologia* 54, 77-87

* **Traitement statistique :** les lettres différentes (A, B, C) indiquent que les effets des différents traitements sont significativement différents.

RÉGULATION DE LA QUALITÉ DU SOL ET DE LA QUALITÉ SANITAIRE

LES ÉLÉMENTS TRACES

MÉTALLIQUES

Afin de pouvoir conclure à l'intérêt du retour au sol des PRO et de leur utilisation en agriculture, il est nécessaire de garantir aux agriculteurs l'innocuité de la pratique. Les apports de contaminants organiques et minéraux sont un des questionnements majeurs qui se posent concernant cette pratique. Depuis la mise en place de l'essai QualiAgro (voir p.14), l'évolution des concentrations en Eléments Traces Métalliques (ETM) est suivie dans les sols et les plantes et mise en regard des flux apportés *via* les PRO.

Depuis 1998, les concentrations en Cuivre et Zinc ont augmenté dans les horizons d'enfouissement des PRO (Figure 17). Ces augmentations sont observées dans tous les traitements organiques. Comme les apports de PRO sont trois fois supérieurs aux doses classiques épandues,

les 15 ans d'essais du site QualiAgro représentent les effets de 45 ans de pratique classique. Néanmoins, les concentrations mesurées sont du même ordre de grandeur que celles mesurées dans les sols similaires de la région. Les augmentations des autres ETM sont beaucoup plus faibles voire non significatives. Les flux d'ETM apportés *via* les PRO restent dans l'horizon d'enfouissement des PRO. Les flux absorbés par les plantes sont très faibles et ne se différencient pas entre traitements y compris le témoin : il n'y a pas d'impacts sur la qualité des récoltes (Cuivre et Zinc dans les grains de maïs en exemple dans la Figure 18). Les flux mesurés dans les eaux sont également très faibles.



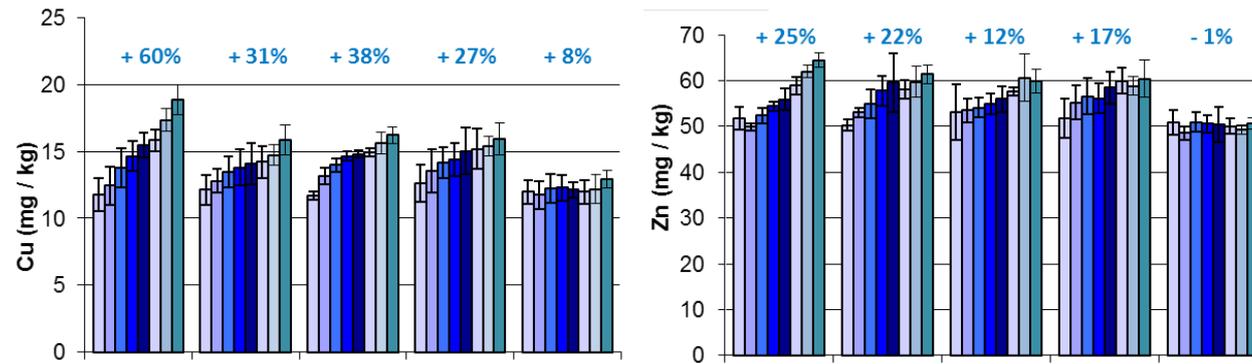


Figure 17 : Augmentation entre 1998 et 2013, des teneurs en Cuivre et Zinc dans les différents traitements du site QualiAgro et en lien avec les apports successifs de PRO

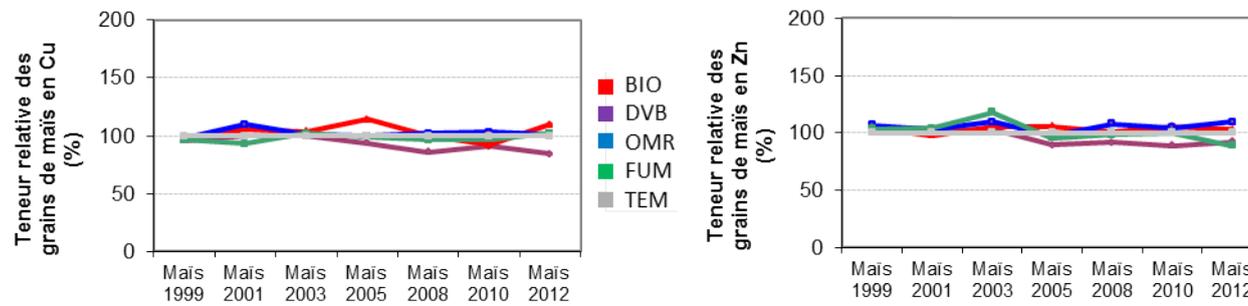


Figure 18 : Teneurs en Cuivre (gauche) et Zinc (droite) du maïs pour les différents PRO épandus depuis 1999 sur le site de QualiAgro en % par rapport aux grains récoltés dans les parcelles témoin

À retenir

Des apports importants de PRO augmentent les teneurs de certains éléments traces métalliques du sol, tout en restant dans des niveaux similaires à ceux de sols de mêmes types et sans transferts vers les récoltes.

RÉGULATION DE LA QUALITÉ DU SOL ET DE LA QUALITÉ SANITAIRE

TRANSFERT DE POLLUANTS

ORGANIQUES À LA COUCHE

SUPERFICIELLE DU SOL

Les polluants organiques persistants (POP) se retrouvent presque partout dans notre environnement, y compris dans les régions les plus isolées comme l'Arctique, où ces composés n'ont jamais été utilisés. Les apports de PRO constituent une source de POP dans les sols. Les apports de MO associée aux PRO vont également modifier les relations entre les POP et la MO du sol qui conditionnent la disponibilité des POP. En effet, la présence de POP dans le sol ne signifie pas systématiquement que ces POP sont disponibles et vont être transférés dans les cultures en place sur ce sol.

Les dioxines et furannes chlorées, les dioxines et furannes bromées, les PCB et une classe de retardateurs de flamme bromés, les PBDE, ont été étudiés dans différents essais au champ en France et en Suède. Ces contaminants sont présents dans les sols témoins en dehors de tout apport de PRO, en faibles concentrations et pouvant s'expliquer par des dépôts atmosphériques.

Les amendements utilisés dans les essais au champ étudiés contiennent tous des POP, mais les teneurs sont majoritairement faibles et varient largement entre les différents types d'amendements et les POP en questions (concentrations toxiques en dioxines dans les différents PRO de 2 à 27 ng/kg MB). Les doses d'apports de PRO dans les différents sites étudiés dépassent souvent les doses classiques en France et en Suède. Les concentrations en POP augmentent dans la plupart des sols amendés, mais les augmentations constatées dans les sols sont inférieures aux flux de POP apportés par les amendements. Cela peut s'expliquer par la dégradation des composés, leurs interactions avec la MO des sols qui les rendent inextractibles ou leur transport dans les couches inférieures du sol. Par ailleurs, les résultats montrent aussi que les concentrations peuvent être plus faibles dans les sols amendés que dans les sols témoins n'ayant reçu aucun amendement, ce qui est le cas des PCB dans le site de Colmar (Figure 19).

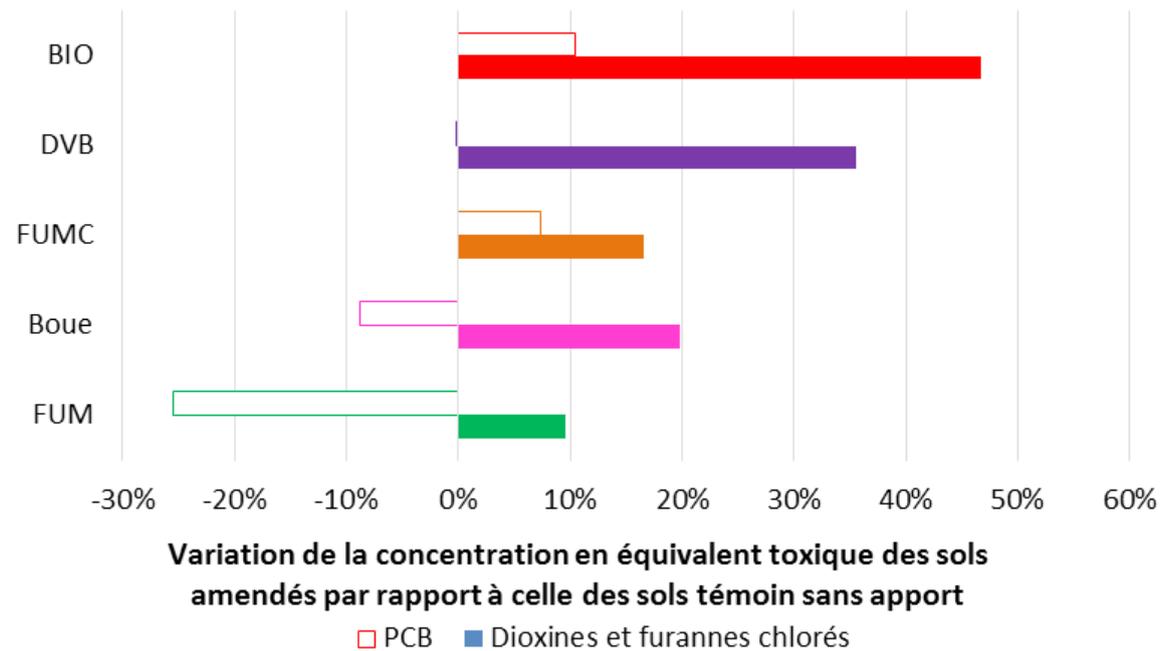


Figure 19 : Evolutions des concentrations en équivalents toxiques de deux catégories de POP, les dioxines et furannes chlorés (barres pleines) et les PCB (barres vides) dans les sols des traitements amendés par rapport au sol témoin dans le site de Colmar deux ans après le dernier épandage

À retenir

Le transfert de Polluants Organiques Persistants (POP) au sol via l'épandage est spécifique de chaque site et dépend de plusieurs facteurs liés au sol et aux amendements. Néanmoins, la concentration dans le sol après apport de PRO ne diffère que peu des sols témoins sans apports.

RÉGULATION DE LA QUALITÉ SANITAIRE

TRANSFERT DE PATHOGÈNES HUMAINS

ET DE GÈNES DE RÉSISTANCE AUX

ANTIBIOTIQUES

Les PRO, d'origine urbaine ou agricole, peuvent contenir des pathogènes humains et des bactéries résistantes aux antibiotiques. L'utilisation de ces PRO soulève la question du devenir de ces pathogènes et des gènes de résistance aux antibiotiques dans les sols amendés et les matrices environnementales, voire de leur transfert aux productions agricoles primaires végétales ou animales.



Figure 20 : Localisation des 3 essais au champ :
Rennes, Feucherolles et Colmar

Un pathogène alimentaire ubiquiste (*Listeria monocytogenes*), deux bactéries indicatrices de contamination fécale (*Escherichia coli* et *Enterococcus faecalis*), et un gène de résistance aux antibiotiques (*bla* CTX-M) ont été recherchés dans les amendements et les sols amendés par 11 PRO différents traités ou non par compostage et utilisés sur trois sites expérimentaux en France, en associant des méthodes de détection et quantification par cultures et/ou détection moléculaire.

L. monocytogenes a été détectée en très faible quantité dans deux amendements utilisés mais jamais dans les sols amendés. Les bactéries indicatrices de contamination fécale (en particulier *E. coli*) et le gène de résistance aux antibiotiques ont été retrouvés dans les boues de station d'épuration et les fumiers. Le compostage de ces boues et de ces fumiers réduit fortement la teneur en bactéries d'origine fécale et en gènes de résistance. En absence de compostage des PRO, les sols amendés par des boues urbaines ou des fumiers peuvent être contaminés par des bactéries fécales et des gènes de résistance sur des périodes d'au moins un mois après épandage.

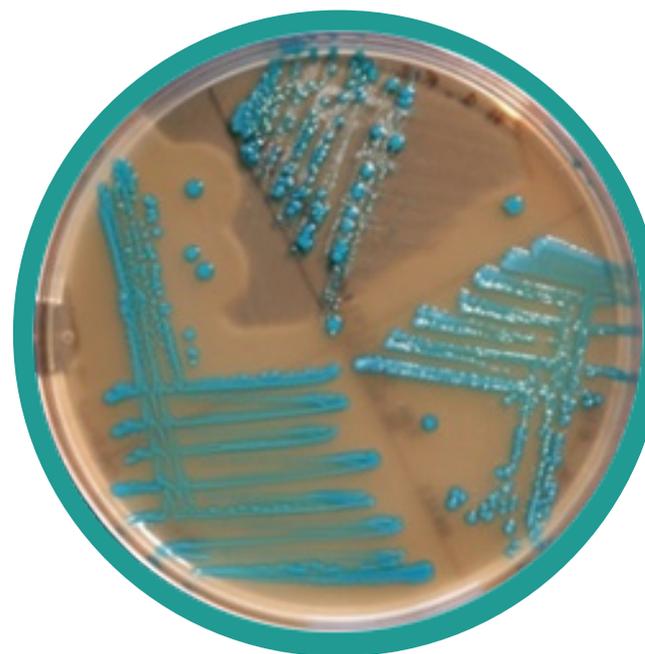


Figure 21 : Cultures sur boîte de Petri

À retenir

Il est possible de réduire fortement la dissémination de bactéries d'origine fécale et de gènes de résistance aux antibiotiques en compostant les PRO avant épandage sur les sols agricoles. L'épandage de boues urbaines brutes (non compostées) semble la pratique la plus à risque en terme de dissémination de gènes de résistance aux antibiotiques.

LES 4 PARTENAIRES

DU PROJET ECOSOM

VEOLIA RECHERCHE ET INNOVATION



A travers sa structure dédiée – Veolia Recherche & Innovation (VERI), le Groupe Veolia mobilise ses 850 chercheurs et développeurs ainsi que ses six centres de recherche dans le monde autour de quatre objectifs : préserver les ressources, limiter les impacts sur les milieux naturels, réduire les émissions de gaz à effet de serre et gérer durablement le développement urbain. S'appuyant sur une excellence scientifique reconnue, VERI a pour mission de répondre pleinement aux besoins des clients industriels et municipaux, d'améliorer la performance globale et la productivité des procédés de Veolia et de ses clients, tout en anticipant les besoins de demain.

A travers son activité Propreté et sa filiale SEDE Environnement, le Groupe VEOLIA contribue à la valorisation des Produits Résiduaux Organiques.

VERI a été en charge de la coordination de la rédaction de la présente brochure et de la diffusion des résultats du projet ECOSOM.

<http://www.sede-environnement.com/fr>

<http://www.veolia-proprete.fr>

ALTERRA



Alterra, partie intégrante de l'Université de Wageningen, est le principal centre de recherche néerlandais d'expertise sur les zones rurales. Alterra a pour missions la formation et la recherche stratégique et appliquée pour soutenir l'élaboration des politiques et la gestion territoriale des zones rurales. Alterra est impliqué dans tous les aspects des écosystèmes : les sols, l'eau, le climat et l'utilisation des terres. Ses travaux de recherche, menés à des échelles locales, régionales, nationales et internationales, contribuent à une utilisation durable des ressources naturelles et à la conception et la gestion durable de l'environnement.

Alterra a coordonné les mesures des propriétés physiques des sols en lien avec l'activité lombricienne et était en charge de la partie consacrée aux effets du travail simplifié des sols.

<http://www.wageningenur.nl/fr.htm>

UMEA UNIVERSITY



Le Département de Chimie de l'Université d'Umeå, au Nord de la Suède, est l'un des plus grands départements de la Faculté des Sciences et Technologies, avec ses 220 collaborateurs. La recherche au sein du Département de Chimie est regroupée en 3 domaines : chimie environnementale et biogéochimie, chimie biologique et chimie technique.

Umea University a quantifié les contaminants organiques dans les sites du projet.

www.chemistry.umu.se



INRA

L'Institut national de la recherche agronomique (INRA) est le premier organisme de recherche européen dans le domaine de l'agriculture. Il accompagne l'innovation économique et sociale dans les domaines de l'alimentation, de l'agriculture et de l'environnement. Deux Unités Mixtes de Recherche (UMR) ont participé au programme ECOSOM :

- (1) l'UMR INRA-AgroParisTech «Environnement et Grandes Cultures» à Grignon (EGC), dont les recherches ont pour objectif de décrire et modéliser le fonctionnement des agrosystèmes de grandes cultures du Nord de l'Europe en interaction avec les facteurs de l'environnement biotique et abiotique (climat, sol, pratiques culturales, pathogènes), (<http://www6.versailles-grignon.inra.fr/egc/>) ;
- (2) l'UMR INRA-AgroSup à Dijon dont les recherches visent les interactions biotiques (en particulier plantes-plantes et plantes-microorganismes) au sein des agrosystèmes afin de concevoir des systèmes de culture innovants respectueux de l'environnement ; (<http://www6.dijon.inra.fr/umragroecologie>).

Partenaire de l'UMR EGC, AgroParisTech forme près de 2000 étudiants par an dans les domaines du vivant et de l'environnement (<http://www.agroparistech.fr/>). L'INRA a été en charge de la coordination du projet ECOSOM, de la partie consacrée aux activités microbiennes et de l'évaluation de la résilience des sols par rapport aux germes pathogènes.

SNOWMAN NETWORK
Knowledge for sustainable soils



SNOWMAN

Le réseau SNOWMAN rassemble des institutions publiques compétentes en environnement en Europe dans le but d'approfondir et de promouvoir la connaissance sur la gestion durable des sols. Il coordonne et finance *via* ses membres des appels à projets européens sur la thématique des sols et eaux souterraines en Europe.

En savoir plus :
<http://www.snowmannetwork.com>



LE PROJET ECOSOM

Durant 3 ans, les travaux de recherche du projet ECOSOM se sont intéressés à la pratique du recyclage des Produits Résiduaire Organiques (PRO) en agriculture dans un objectif global d'amélioration des services écosystémiques rendus par le sol aux agriculteurs.

La matière organique et la structure du sol sont au cœur de la problématique en tant que facteurs clés dans le fonctionnement des sols et la fourniture des services écosystémiques, tels que le maintien d'une biodiversité fonctionnelle, la régulation du climat et de l'eau, la production agricole, etc.

La compréhension des mécanismes biologiques, chimiques et physiques liant cette pratique agricole aux services écosystémiques a fait l'objet de suivi expérimental basé sur des essais au champ de longues durées où différents types de Produits Résiduaire Organiques sont étudiés depuis plus de 10 ans.

La gestion durable des sols est l'un des grands enjeux environnementaux actuels dans une perspective de protection d'une ressource de plus en plus accaparée et dégradée, les sols agricoles.

RÉDACTION

Jaap Bloem (Alterra, Wageningen, Pays-Bas)
Géraldine Depret (INRA, Dijon, France)
Jack Faber (Alterra, Wageningen, Pays-Bas)
Alain Hartmann (INRA, Dijon, France)
Sabine Houot (INRA, Grignon, France)
Lisa Lundin (Umea University, Umea, Suède)
Fiona Obriot (INRA, Grignon, France)
Agathe Revallier (VERI, Limay, France)
Laure Vieublé-Gonod (AgroParisTech, Grignon, France)

Les résultats présentés dans cette brochure sont issus des programmes de recherche ECOSOM (SNOWMAN 2011-2014), QualiAgro (INRA-VERI 1998-2018), Colmar (INRA-ARAA-SMRA 2000-2018) et Bioindicateurs (ADEME 2009-2012). Les auteurs remercient les contributeurs de ces différents programmes.

Photos : INRA et VERI