

EFFET A LONG TERME D'APPORTS REPETES DE PRODUITS RESIDUAIRES ORGANIQUES (PRO) SUR LE FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DES SOLS CARACTERISE PAR L'ETUDE DU BIO-INDICATEUR NEMATOFANE



Camille Chauvin¹ ; Cécile Villenave¹

¹ELISOL environnement, ZA des Tourels, 10 avenue du midi, 30111 Congénies.

INTRODUCTION

Le retour au sol des produits résiduels organiques (PRO) peut être un levier pour améliorer les propriétés des sols agricoles. L'apport de matières organiques impacte positivement le recyclage des nutriments et la transformation du carbone, principalement assuré par les organismes du sol. Toutefois, il existe une grande diversité de PRO et donc de types de matières organiques qui peuvent avoir des effets variables sur le fonctionnement biologique des sols et dans certains cas, générer des impacts négatifs. Des outils d'évaluation des effets des PRO sur les organismes du sol sont aujourd'hui nécessaires pour mieux évaluer l'impact de ces apports sur le fonctionnement biologique des sols et plus largement sur la durabilité des systèmes de culture.

L'observatoire de recherche sur les PRO a été créé par l'INRAE au début des années 2000 afin d'évaluer les effets agronomiques et les potentiels risques du retour au sol de divers PRO. Labellisé en tant que Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement (SOERE), cet observatoire réunit 4 sites (QualiAgro, PROspective, EFELE, La Réunion) où ont été mis en place des dispositifs expérimentaux de longue durée. L'objectif de ces dispositifs est de tester l'effet d'apports à long terme de PRO dans des systèmes de culture représentatifs des territoires qui les accueillent (respectivement plaine de Versailles, plaine du Pays Rhin, Coglais en Bretagne, côte Ouest de la Réunion).

Dans le cadre du projet PROTERR (GRAINE ADEME), les communautés de nématodes ont été analysées dans ces 4 dispositifs expérimentaux afin de faire un diagnostic de l'état et du fonctionnement biologique du sol. Les nématodes sont des organismes microscopiques vermiformes (longueur de l'ordre de 1 mm pour un diamètre de 20 µm). Ils représentent 4/5 des organismes pluricellulaires et sont ainsi les organismes pluricellulaires (les métazoaires) parmi les plus abondants sur terre (Van Hoogen et al., 2020). Les communautés de nématodes du sol, aussi appelée « nématofaune », sont utilisées comme bio-indicateur de l'état biologique des sols (Bongers et Ferris, 1999). Elles peuvent être utilisées pour caractériser l'impact d'une pratique agricole ou d'un système de culture sur l'activité et le fonctionnement biologique des sols (Coll et al., 2012). Les nématodes participent activement aux divers processus du sol tel que la minéralisation des matières organiques notamment par leur influence sur la biomasse, la composition et l'activité des communautés microbiennes du sol (Mikereit et al., 2021 ; Trap et al., 2016). Ils sont particulièrement adaptés pour étudier l'effet d'un apport de matière organique sur le fonctionnement biologique des sols et les fonctions liées à la transformation des matières organiques (Ferris & Bongers, 2006). Leurs réponses dépendent à la fois de la quantité, de la qualité et des fréquences de ces apports (Liu et al., 2016 ; Chauvin et al., 2015). Brièvement, l'apport aux sols de matières organiques et leur contenu en C et N représentent une ressource pour les organismes décomposeurs (bactéries et champignons) dont l'activité stimule et est stimulée par la présence d'organismes qui les consomment comme des nématodes bactériophages ou fongiphages. De cette activité stimulée découle une minéralisation plus efficace des matières organiques ainsi que des flux de nitrates et autres nutriments plus importants ; c'est le phénomène de boucle microbienne (Trap et al., 2016). Dans ce contexte, de nombreuses études pointent la quantité de carbone organique apportée par les PRO comme le paramètre prépondérant de leurs effets sur les communautés de nématodes du sol (synthèse dans Liu et al., 2016).

Les connaissances actuelles permettent de modéliser de manière satisfaisante les flux de nutriments issus d'un apport de PRO (Levavasseur et al., 2021), elles ne sont cependant pas suffisantes pour anticiper

ses effets sur le fonctionnement biologique des sols. Tout comme les flux de nutriments, ces effets peuvent dépendre de nombreux paramètres comme le type de PRO, les quantités apportées, les fréquences ou encore les caractéristiques pédo-climatiques du site ou ils sont apportés. Des analyses spécifiques à un niveau local sont nécessaires pour identifier ces paramètres. Par ailleurs, de nouveaux types de PRO font leurs apparitions dans les territoires comme les composts de biodéchets, les co-compost de boue et de déchets verts, les biochars issus de pyrolyse ou encore les digestats de méthanisation (Houot et al., 2014). Les effets de ces nouveaux PRO sur le fonctionnement biologique des sols n'ont pas encore été évalués.

L'étude de la nématofaune des sols des sites expérimentaux de longue durée du SOERE-PRO avait pour objectif de tester l'effet de l'apport répété de différents PRO dans plusieurs contextes pédolo-climatiques en disposant d'informations précises sur la qualité des PRO et leurs conditions d'apport. Dans cette étude, nous nous intéressons particulièrement à l'effet des quantités de carbone apportées, avec comme hypothèse que la quantité cumulée de carbone apportée explique la réponse des communautés de nématodes dans des expérimentations à long terme (supérieures à 5 ans). Cette étude cible spécifiquement les 3 sites situés en France hexagonale du SOERE-PRO. L'objectif est de mettre en avant les critères d'apport de PRO nécessaires pour anticiper leurs effets sur le fonctionnement biologique des sols.

MATERIEL ET METHODES

Les sites du SOERE-PRO



Figure 1 : Localisation géographique des 3 sites expérimentaux du SOERE-PRO suivis dans cette étude : EFELE, PROSPECTIV et Quali'Agro

L'essai de Quali'Agro a été mis en place en 1998 à Feucherolles dans les Yvelines (78). D'une surface de 6 ha, il est divisé en 40 parcelles expérimentales de 450m² chacune. Les traitements « apports de PRO » sont comparés à une modalité témoin qui reçoit un amendement organique annuel (Tableau 1). Depuis 2013, la co-fertilisation minérale des parcelles a été stoppée et les apports biannuels de PRO ont été maintenus avec un dernier apport en 2017. Depuis 2013, la succession culturale a été la suivante : Moutarde-blé-orge-maïs-seigle-orge-luzerne avec un labour profond annuel (0-25 cm), la restitution des résidus de récolte et des périodes de sol nu de plusieurs mois. Le site est implanté sur un luvisol (limoneux lessivé). Il présente de forte teneur en limons (> 600 g/kg) avec une sensibilité à la battance. En 1998, le site présentait une teneur en matière organique faible pour ce type de sol (1,7 %) et un pH neutre (pH = 6,9). Après 20 ans d'apports des différents PRO, on observe une augmentation significative des teneurs en C organique et N total sur ce site en suivant l'ordre suivant : TEM < OMR = FUM < DVB = BIO (Figure 2).

PROSPECTIV est un dispositif expérimental de 2 ha mis en place en 2000 sur l'unité expérimentale INRAe de Colmar (Haut-Rhin- région Grand-Est). Depuis 2014, le site suit un pilotage de la fertilisation par des apports de PRO sans engrais minéraux permettant de couvrir les besoins en azote de chaque culture et de compenser les exportations de phosphore et de potassium. Le système de culture intègre l'implantation de CIPAN (moutarde) et la restitution des chaumes après les récoltes de blé et d'orge. Les PRO sont apportés à raison d'un apport tous les deux ans, soit 3 apports de PRO entre 2013 et 2018 avec un dernier apport en 2016. La succession culturale est la suivante : maïs-blé-moutarde-betterave-orge-moutarde-maïs-blé avec un labour profond annuel (0-28cm), la restitution des litières de moutarde, de blé et d'orge ainsi que des périodes de sol nu de plusieurs mois. Le site est implanté sur un calcosol profond issu de loess. Il présente de fortes teneurs en limon ($> 600\text{g/kg}$) et en carbonate, une teneur en matière organique satisfaisante ($>2\%$) ainsi qu'un pH a tendance alcaline ($\text{pH} = 8-8,5$). En 2018, soit après 18 ans d'apports, les apports de PRO ont induit une légère augmentation de la teneur en C organique et N total des sols sur ce site (Figure 1).

EFELE est un site expérimental mis en place en 2012 par l'UMR SAS dans les parcelles du lycée agricole du Rheu (Ille et Vilaine). Depuis 2012, les PRO sont apportés à raison d'un apport annuel (dernier apport en 2017) ou biennal pour les apports de fumier (Fum) et de compost de lisier (CP) avec un dernier apport en 2016. La succession culturale est la suivante : maïs-blé-moutarde avec un labour profond annuel (0-28cm), la restitution des litières de moutarde et des périodes de sol nu courtes (1 mois). Le site est implanté sur un luvisol-redoxisol issu de limons éoliens sur terrasse alluviale. Il présente de forte teneur en limons ($> 600\text{g/kg}$), une teneur en matière organique satisfaisante ($>2\%$) ainsi qu'un pH a tendance acide ($\text{pH} = 6-6,5$). Après 4 ans d'apports, il n'a pas été mesuré de différences de teneurs en C organique et N total entre les modalités sur le site d'EFELE (Figure 1).

Les pratiques d'apports de PRO sur la période 2013-2018 ainsi que les caractéristiques principales des PRO (rapport C/N et Indice de Stabilité des Matières Organiques : ISMO) sont reportées dans le tableau 1. Les PRO présentent des C/N allant de 3,0 à 26,2 et des valeurs d'ISMO allant de 42,0 à 75,1. Le cumul des quantités de carbone organique apportés par les PRO varient entre $2,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ à $13,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ sur la période 2013-2017. Celui des quantités d'azote organique varient de $0,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ à $1,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Les apports de PRO sont comparés à des parcelles témoin sans apport de PRO, avec apport d'azote minéral (TEM_N, MIN) ou sans (TEM, 0N).

Sur les 3 essais, les modalités étudiées étaient répétées sur 4 parcelles indépendantes ($n=4$).

Tableau 1 : Type de Produit Résiduaire Organique (PRO) et descriptions des apports sur les trois sites étudiés Quali'Agro, PROSPECTIV et EFELE. C/N = rapport carbone sur Azote, ISMO = Indice de Stabilité des Matières Organiques, Qté_C_PRO_2013-2017 = cumul des apports de carbone par les PRO sur la période 2013-2017 ; Qté_N_PRO_2013-2017 = cumul des apports d'azote apportés par les PRO sur la période 2013-2017.

Site	Modalité	Description	C/N	ISMO	Qté_C_PRO 2013-2017 (T/Ha)	Qté_Norg_PRO 2013-2017 (T/Ha)
QualiAgro	TEM	Témoin sans apport	-	-	-	-
	FUM	Fumier de bovins	16,0	55,4	7,6	0,5
	DVB	Compost de boue d'épuration	10,3	70,9	8,9	0,9
	BIO	Compost de biodéchets	11,6	68,1	9,2	0,8
	OMR	Compost d'ordures ménagères	15,0	42,0	9,3	0,5
PROSPECTIV	TEM_N	Témoin fertilisation minérale	-	-	-	-
	DIG	Apport digestat	3,0	61,4	2,7	0,9
	BOUE	Boue d'épuration	6,4	56,0	3,3	0,5
	FUMC	Compost de fumier de bovins	12,0	63,6	8,1	0,6
	DVB	Compost de boue d'épuration	9,8	75,1	10,0	1,1
	BIO	Compost de biodéchets	13,2	63,4	12,0	1,0
EFELE	FUM	Fumier de bovins	26,2	52,5	13,5	0,7
	ON	Témoin sans apport	-	-	-	-
	MIN	Témoin fertilisation minérale	-	-	-	-
	FV	Fumier de volaille	9,3	52,9	1,9	0,2
	DIG-LP	Digestat de méthanisation	4,4	56,6	3,2	0,9
	LP	Lisier de porc	6,5	44,1	4,0	0,9
	CP	Compost de fumier de Porc	13,2	61,6	6,5	0,5
FUM	Fumier Bovin	17,3	61,1	13,5	0,8	

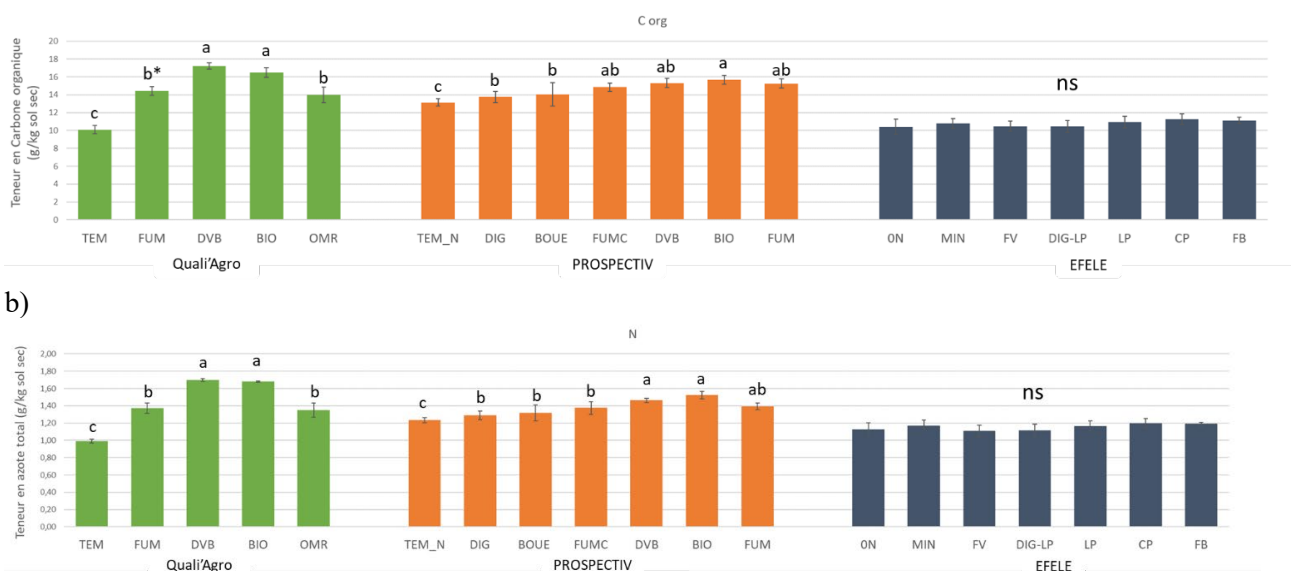


Figure 2 : Teneurs en a) carbone organique (Corg) (mg.kg⁻¹) et b) azote total (N) (mg.kg⁻¹) dans les sols des trois sites. Les barres d'erreurs représentent les écart-types. Au sein de chaque site, les moyennes partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes (ANOVA, p-value > 0,05), * : p-value < 0,1 ; ns = non-significatif. Les analyses ont été réalisées en 2018 et dans la strate 0-28cm pour les sites de Quali'Agro et PROSPECTIV, en 2016 et dans la strate 0-25cm pour le site EFELE.

Echantillonnage du sol

Pour chaque parcelle, un échantillon composite de terre a été réalisé à partir de 6 prélèvements individuels effectués à la tarière. La profondeur d'échantillonnage de chaque site a été adaptée à la profondeur d'enfouissement des PRO : Quali'Agro = 0-28cm (20 échantillons), PROSPECTIV = 0-20cm (28 échantillons) et EFELE = 0-15cm (28 échantillons). Les échantillonnages ont eu lieu au printemps 2018. Un ensemble de 76 échantillons ont ainsi été prélevés.

Analyses de la nématofaune

Pour chaque échantillon, les communautés de nématodes ont été analysées selon la norme NF/ISO 23611-4. Les nématodes ont été extraits à partir de 300g de sol en utilisant un élutriateur d'Oostenbrink suivi d'un passage actif sur tamis. Les nématodes ont ensuite été dénombrés sous loupe binoculaire (X 100) puis fixés dans une solution au formaldéhyde (4%) afin d'être identifiés au microscope (X 400) au niveau du genre ou de la famille. Entre 150 et 200 nématodes ont été identifiés par échantillon. Après identification, chaque nématode a été assigné à un groupe trophique (bactérovore, fongivore, prédateur, phytophage facultatif, phytoparasite) et à une guildes fonctionnelle en se reportant à Bongers and Bongers., 1998. Chaque stratégie de survie au sein d'un groupe trophique forme une guildes fonctionnelle. Par exemple, au sein des nématodes bactérovores on distingue deux sous-groupes : les nématodes bactérovores opportunistes ou cp1 (Bactérovores_cp1) qui ont des taux de reproduction très rapides et se multiplient dans les milieux enrichis ; les autres nématodes bactérovores ou cp2-4 (Bactérovores_autres) qui ont des temps de génération plus longs et se retrouvent préférentiellement dans des milieux plus stables. Les abondances de nématodes sont exprimées en nombre de nématodes pour 100g de sol sec. Les abondances des nématodes de chacun des groupes trophiques sont des paramètres utilisés pour le diagnostic de l'état du sol. Les informations sur l'abondance de chaque guildes fonctionnelle sont également exploitées pour calculer des indices traduisant le fonctionnement de la communauté de nématodes. Un de ces indices est l'indice de structure (SI). Cet indice traduit la complexité du réseau trophique et donne une indication sur la stabilité du milieu. Plus l'indice de structure est élevé, moins le milieu est perturbé (Bongers and Ferris., 2001). La richesse spécifique au niveau de la famille (nombre de famille observé par traitement) a également été calculé.

Analyses statistiques :

Pour chaque site et chaque paramètre nématofaunique, des analyses de la variance (ANOVA à 1 facteur) ont été réalisées pour comparer les modalités. Quand cela était nécessaire, les données ont été transformées ($\log(x+1)$ ou racine(x)) et des analyses post-hoc ont été effectuées (test de student, correction de Bonferroni, p-value < 0,05). Des analyses de co-variance (ANCOVA) ont également été réalisées en prenant compte la quantité de carbone apportée par les PRO, le type de PRO et le site. Pour les PRO dont l'apport a été répété sur au moins 2 sites (FUM, BIO, DVB, DIG), la réponse de l'abondance absolu de nématodes par groupes trophiques et par guildes fonctionnelles à l'application de ces PRO a été évalué en calculant l'indice V proposé par Henneron et al (2015) tel que :

$$V = \frac{2 * Ab_{PRO}}{Ab_{PRO} + Ab_{TEM}} - 1,$$

avec Ab_{PRO} = abondances de nématodes pour le traitement avec apport de PRO et Ab_{TEM} = abondances de nématodes pour le traitement Témoin du site. A PROSPECTIV et EFELE, le témoin avec fertilisation minérale ont été pris comme référence (TEM_N ; MIN) ; à Quali'Agro le témoin sans fertilisation a été pris comme référence (TEM). Pour chaque paramètre, la moyenne de l'indice V et l'erreur standard sont présentés sous forme graphique. L'indice V varie de (-)100% (inhibition maximum) à (+)100% (stimulation maximale) ; 0 équivaut à des abondances identiques dans les deux traitements. Un calcul identique a été réalisé pour les indices SI et Richesse spécifique. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R v3.6.3 et les packages Car et multcomp.

RESULTATS & DISCUSSION

Analyse de la nématofaune

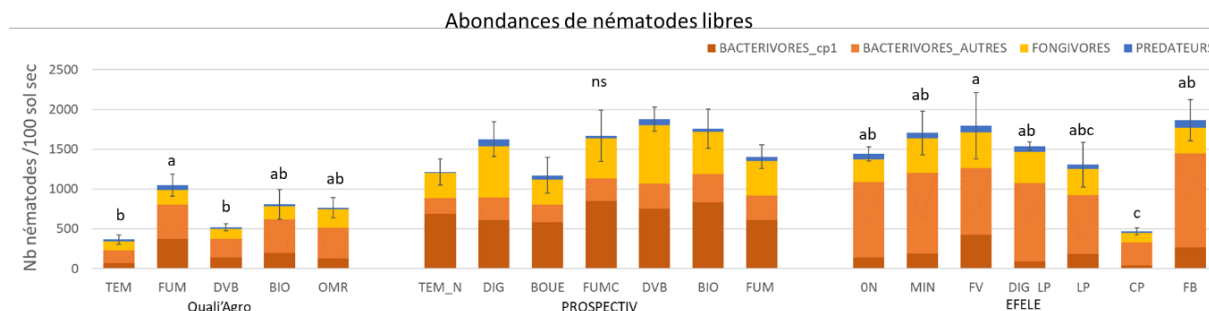


Figure 3: Abondance des nématodes libres (nb nématodes.100g⁻¹ sol sec) des différents types trophiques dans les sols des trois sites étudiés. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards. Pour chaque site, les modalités partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes (ANOVA, p-value > 0.05), * : p-value < 0,1 ; ns = non-significatif.

En l'absence d'apport de PRO, les sols témoin des sites expérimentaux présentaient des fonctionnements biologiques distincts. A Quali'Agro, l'activité biologique du témoin (TEM) pouvait être considérée comme faible comme en témoigne l'abondance de nématodes libres observée dans ce sol (364 nématodes.100g⁻¹ sol sec; Figure 3). En revanche, l'activité biologique du témoin de PROSPECTIV (TEM_N) et de EFELE (ON et MIN) pouvait être considérée comme élevée à très élevée (1212 nématodes.100g⁻¹ sol sec, 1442 et 1704 nématodes.100g⁻¹ sol sec respectivement). Ces valeurs sont comprises dans la gamme de variation pour un usage en grandes cultures (référentiel ELIPTO®) ainsi que dans une étude réalisée en Bretagne (109 échantillons) dans des parcelles en grandes cultures (min = 384 ind.100g⁻¹ de sol, max = 3548 nématodes.100g⁻¹, Villenave et al. 2013).

Les nématodes opportunistes bactérivore_cp1 (indicateurs de flux de nutriments importants) dominaient dans les sols témoins du site de PROSPECTIV tandis que les nématodes bactérivores_autres, indicateurs de milieu plus stables dominaient dans ceux du site d'EFELE et de Quali'Agro (Tableau 2). Ces résultats indiquent des flux de nutriments plus importants dans les sols du site de PROSPECTIV et des flux modérés dans les sols d'EFELE et Quali'Agro à la date de prélèvement. Les différences pédo-climatiques mais aussi l'historique des parcelles sont à l'origine de ces différences : Les enquêtes sur les sites ont révélé des apports réguliers de fumier bovin à PROSPECTIV et EFELE sur les 50 dernières années, ce qui n'est pas le cas à Quali'Agro. De plus, l'état du sol au moment du prélèvement n'était pas le même entre les 3 sites : une culture de blé d'hiver était en cours à PROSPECTIV, tandis qu'un couvert de moutarde était installé à EFELE et que le sol était nu à Quali'Agro.

Les nématodes prédateurs étaient très peu abondants dans les sols témoins des trois sites, indiquant des milieux à tendances perturbées et peu favorables pour ces organismes sensibles aux perturbations physiques et chimiques. Ces conditions sont couramment observées en grandes cultures (DuPont et al., 2009 ; référentiel ELIPTO®).

Tableau 2 : Abondances des différents types trophiques de nématodes (nb nématodes.100g⁻¹ sol sec) dans les sols des trois sites étudiés. Au sein de chaque site et pour chaque type trophique, les moyennes partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes (ANOVA, p-value < 0.05), * : p-value < 0,1 ; ns = non-significatif. Libres = (Bactérovores cp1 + Bactérovores_autres + Fongivores + Prédateurs) ; Phytophages = (Phytoparasites + Phytophages facultatifs).

Site	Traitement	Bactérovores cp1	Bactérovores autres	Fongivores	Prédateurs	Libres	Phytoparasites	Phytophages facultatifs	Phytophages
Quali'Agro	TEM	68 b	158 b*	113 c	26 ab	364 b	373 a	410 a	783 a
	FUM	370 a	436 a	179 a	65 a	1050 a	553 a	574 a	1127 a
	DVB	141 ab	231 ab	127 bc	18 ab	517 b	437 a	352 a	789 a
	BIO	193 b*	428 ab	164 ab	21 ab	806 ab	548 a	446 a	993 a
	OMR	123 ab	387 a	238 abc	19 b*	767 ab	396 a	598 a	993 a
PROSPECTIV	TEM_N	689 a	197 a	313 a	14 a	1212 a	372 a	463 a	835 a
	DIG	604 a	285 a	650 a	88 a	1627 a	438 a	261 a	698 a
	BOUE	584 a	219 a	313 a	56 a	1172 a	440 a	455 a	894 a
	FUMC	847 a	287 a	502 a	31 a	1667 a	802 a	548 a	1350 a
	DVB	752 a	318 a	732 a	76 a	1878 a	398 a	534 a	932 a
	BIO	832 a	356 a	529 a	43 a	1760 a	418 a	539 a	956 a
	FUM	604 a	313 a	436 a	53 a	1405 a	358 a	873 a	1231 a
EFELE	ON	140 a	945 ab	286 ab	72 a	1442 ab	329 ab	2079 a	2409 a
	MIN	191 a	1010 ab	435 a	69 a	1704 ab	807 a	1011 b	1818 abc
	FV	425 a	838 ab	450 a	82 a	1794 ab	658 a	1972 ab	2631 a
	DIG_LP	90 a	987 ab	391 ab	70 a	1537 ab	778 a	1568 ab	2347 a
	LP	186 a	736 abc	329 ab	55 a	1305 abc	617 a	1634 ab	2251 ab
	CP	39 a	291 c	117 b	22 a	467 c	153 b	446 b	599 c
	FB	264 a	1186 a	321 ab	95 a	1866 a	562 a	2115 a	2677 a

L'effet de l'apport des PRO sur les communautés de nématodes dépend du site et du type de PRO. Les apports de PRO ont eu tendance à augmenter l'abondance des nématodes libres, et plus particulièrement les trois types de nématodes microbivores (Bactérovores_cp1, Bactérovores_autres et Fongivores ; Figure 3 et Tableau 2). En revanche, les apports de PRO ont eu peu ou pas d'impacts sur l'abondance des nématodes prédateurs. Sur Quali'Agro, l'apport de Fumier (FUM) a induit une augmentation significative de l'ensemble des nématodes microbivores. L'apport de compost de biodéchets (BIO) a induit une augmentation significative de l'abondance des nématodes fongivores seulement. A PROSPECTIV, les apports de PRO tendent à augmenter l'abondance des nématodes bactérovores_autres et fongivores (non-significatif). A EFELE, seuls les apports de fumier (FB) et de fientes de volaille (FV) ont tendance à augmenter respectivement les abondances des nématodes bactérovores_autres et bactérovores_cp1 (non significatif). Par contre, les apports de compost de lisier porcin (CP) ont significativement réduit les abondances de nématodes bactérovores_autres et fongivores sur ce site. Les nématodes bactérovores et fongivores sont particulièrement impliqués dans les fonctions de transformation des matières organiques et dans la minéralisation des nutriments (Trap et al., 2016) ; l'augmentation de leur abondance indique une stimulation de ces fonctions ou dans le cas contraire, une inhibition de ces fonctions.

La quantité de PRO apportée en termes de carbone n'est pas un facteur suffisant pour expliquer les variations d'abondances de nématodes dans les sols. A EFELE, si les apports de fumier constituent les apports les plus importants (13,5 t.ha⁻¹ de carbone sur 2013-2017), ceux de fientes de volailles sont les apports les plus faibles (1,9 t.ha⁻¹ sur 2013-2017) ; pourtant ces deux PRO tendent à avoir les effets les plus stimulants sur ce site. En revanche, les apports de compost de fumier de porc (CP), dont les apports cumulent 6,5 t.ha⁻¹ de carbone sur 2013-2017, ont significativement réduit l'abondance de nématodes libres sans que cet effet puisse être expliqué. Des analyses de covariances (ANCOVA) entre les quantités de carbone apportées par les PRO et les abondances de nématodes libres ont montré une relation faible à Quali'Agro ($R^2 = 0,21$; p-value < 0,05) et à PROSPECTIV ($R^2=0,05$; p-value < 0,05) et non-significative à EFELE ($R^2=0,03$; p-value > 0,05). Ainsi les quantités de carbone apportées sur les 5 années précédentes ne sont pas un critère suffisant pour anticiper l'effet à moyen

terme d'un apport de PRO sur les abondances de nématodes libres. Dans une méta-analyse à l'échelle globale regroupant plus de 50 études de l'effet d'apport de matières organiques sur les communautés de nématodes, Liu et al. (2016) n'ont également pas pu mettre en avant de lien entre les quantités de carbone apporté par les PRO et l'abondances des nématodes libres. D'après ces auteurs, d'autres facteurs comme le type de PRO, la forme de carbone apportée (labile ou récalcitrante), les teneurs en azote et en autres éléments comme le phosphore ainsi que la fréquence des apports sont susceptibles de faire varier les effets des PRO sur les communautés de nématodes. Les auteurs soulignent toutefois que ce lien est plus important pour les PRO avec de fortes teneurs en carbone comme les composts, les pailles ou les mulch de couverts végétaux.

L'historique des sols sont également à l'origine des variations d'effets des PRO. Par exemple, l'âge du site et la faible répétition des apports réalisés à EFELE (entre 2 et 5 apports depuis 2012) sont probablement à l'origine d'effets moins visibles qu'à Quali'Agro (plus de 10 apports depuis 1998) ou qu'à PROSPECTIV (entre 7 et 10 apports depuis 2000). L'état initial des sols peut également jouer un rôle dans leurs réponses à un apport de PRO. A EFELE ou PROSPECTIV, il est probable que la disponibilité du carbone ne soit pas un facteur limitant du développement des organismes dans les sols. Par conséquent les effets positifs des apports de PRO sont plus modérés dans ces sols que dans un sol considéré en déficit comme à Quali'Agro. Par ailleurs, seul le site de Quali'Agro montre une relation linéaire significative entre les teneurs en carbone des sols et l'abondance de nématodes libres (données non présentées). **Cette étude montre qu'un apport de PRO aura globalement plus d'effets positifs sur le fonctionnement biologique des sols ayant des teneurs en carbone organique considérées comme faible.**

En compilant les données pour les apports de PRO utilisés sur au moins deux essais (FUM, DVB, DIG, BIO) par le calcul de l'indice V, des effets globaux des apports de ces différents PRO ont pu être mesurés. Une réponse positive globale des apports de DVB et de BIO sur l'abondance de nématodes libres a ainsi pu être mis en avant (Figure 4). Les apports de BIO ont eu tendance à stimuler l'abondance de tous les types de nématodes libres, tandis que les apports de DVB ont eu peu d'influence sur l'abondance des bactérivores-cp1. Les apports de FUM ont eu tendance à augmenter l'abondance des prédateurs et bactérivores_autres ; les apports de DIG ont eu tendance à augmenter l'abondance de prédateurs et fongivores mais à réduire l'abondance de bactérivores_cp1.

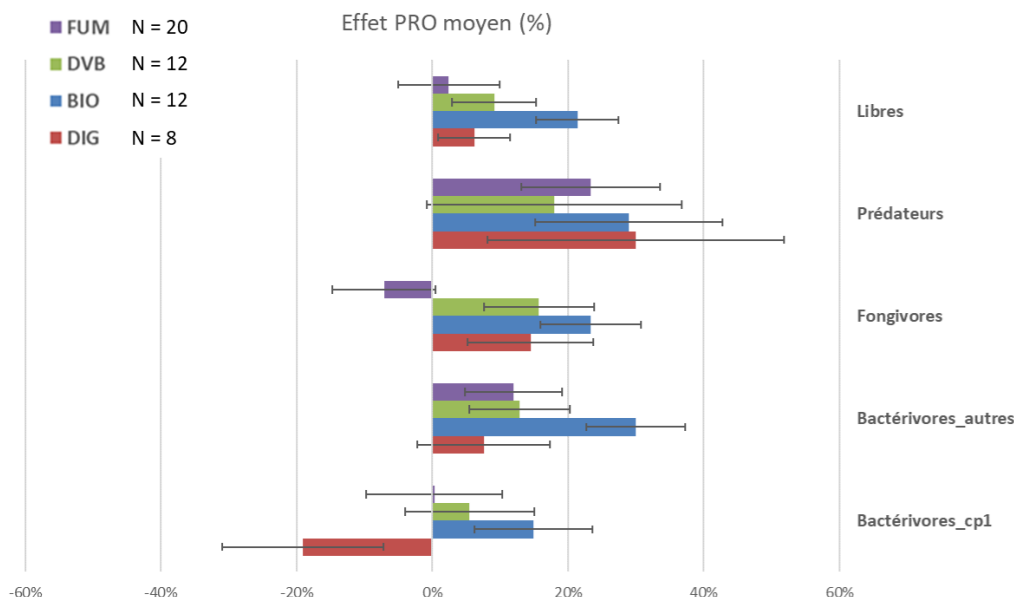


Figure 4 : Index V (représentant le niveau de réponse à l'apport de fumier (FUM), de compost de déchets verts et de boues d'épuration (DVB), de compost de biodéchets (BIO) ou de digestats de méthanisation (DIG) par rapport au témoin de chaque site) de l'abondance absolue des différents groupes trophiques de nématodes du sol. Pour chaque paramètre, la moyenne des indices V et l'erreur standard sont présentées. L'effet est significatif si les barres de l'erreur standard ne chevauchent pas la valeur 0. Les résultats avec apport d'N minéral ont été intégrés pour les modalités FUM et DVB dans cette figure.

Les apports de PRO ont peu influencé la diversité taxonomique et fonctionnelle des communautés de nématodes. Seul l'apport de fumier (FUM) à Quali'agro a permis d'augmenter la richesse spécifique des nématodes. Les apports de PRO ne permettent donc pas le développement de nouveaux taxons de nématodes. Les faibles abondances de nématodes prédateurs que l'on mesure sur les 3 sites sont corrélées à une faible diversité fonctionnelle comme l'indiquent les faibles valeurs de l'Indice de Structure (Tableau 2, Figure 3). Cet indice, initialement faible dans les sols témoins des différents sites (SI<35), tend à être réduit par certain PRO (OMR, FUMC, LP ; non-significatif).

Le calcul de l'indice V sur la richesse spécifique et l'indice de structure illustre également un faible effet des PRO (FUM, DVB, DIG, BIO) sur ces indices ($V < 10\%$ ou nul ; non-présenté). Les communautés d'organismes présentes dans ces sols sont simplifiées et indiquent des milieux perturbés ; de ce fait, elles ne sont pas en mesure de réaliser toutes les fonctions qui peuvent leur être dévolues (eg. Régulations biologiques, patrimoine biologique...). L'apport de PRO seul ne permet pas a priori de favoriser des milieux biologiquement riches avec des communautés de nématodes plus structurées. La simplification du travail du sol en addition de l'apport de fumier à EFELE ou le passage à une culture pluriannuelle de luzerne à Quali'Agro ont toutefois permis une évolution marquée de l'abondance des nématodes prédateurs et de l'indice SI (données non présentées). En combinaison avec des apports de PRO, la réduction du travail du sol et l'implantation de couverts végétaux se révèlent très favorables à la diversité fonctionnelle et taxonomique des communautés de nématodes (Henneron et al., 2015).

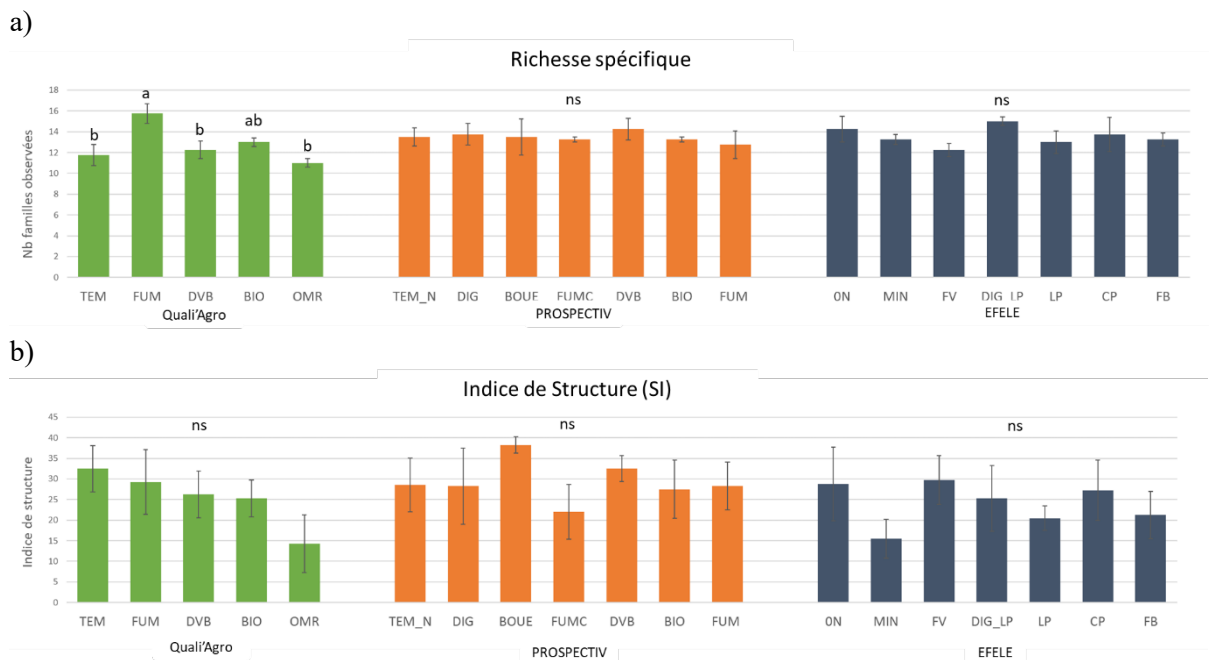


Figure 5 : a) Richesse spécifique en nématodes au niveau de la famille et b) Indice de Structure (SI) des communautés de nématodes des sols des trois sites. Pour chaque site et pour chaque type trophique, les moyennes partageant une même lettre ne sont pas significativement différentes (ANOVA, p -value > 0.05), * : p -value $< 0,1$; ns = non-significatif.

Les nématodes phytophages (phytoparasites et phytophages facultatifs) ont été peu impactés par les apports de PRO dans cette étude (Tableau 2). Seuls les apports de fumier de porc composté (FUMC) réduisent significativement l'abondance des nématodes phytoparasites et probablement leurs impacts sur les cultures. Dans certains cas, les apports de PRO peuvent entraîner une réduction des abondances de nématodes phytoparasites via des effets toxiques ; ces effets peuvent aussi être indirects via une stimulation des régulations biologiques dans le sol (Akhtar & Malik., 2000). En considérant les faibles abondances de nématodes prédateurs, les régulations biologiques sont probablement faibles dans cette étude, ce qui privilégie un effet toxique direct de ce PRO sur l'ensemble de la communauté de nématodes (libres et phytophages).

Conclusions :

Quel que soit le site étudié, les apports de PRO tendent à modifier les paramètres nématofauniques relatifs à la fertilité des sols. **Ils tendent à augmenter les abondances de nématodes bactérivores et fongivores, liés aux fonctions de transformation du carbone et de minéralisation des nutriments.** L'amélioration de ces paramètres est un effet attendu d'une fertilisation organique. Toutefois, l'amplitude de ces effets sur le fonctionnement biologique des sols reste difficile à anticiper avec des effets pouvant parfois être négatifs (Cf. modalité CP).

Les quantités de PRO apportées en termes de carbone cumulés ne sont pas suffisantes pour anticiper l'effet à long terme d'un apport sur les communautés de nématodes. L'effet de chaque PRO est variable et à mettre en regard avec sa composition chimique (caractérisée par le rapport C/N, ISMO, etc...), les quantités apportées et les fréquences de ces apports.

L'effet d'un PRO dépend également des caractéristiques du site sur lequel il est apporté : l'âge des essais, l'historique des parcelles, le système de culture et l'état initial du sol en termes de teneur en carbone et azote doit être considéré pour anticiper l'effet d'un apport de PRO sur le fonctionnement biologique des sols. **L'apport de PRO aura globalement plus d'effets positifs sur le fonctionnement biologique des sols ayant des teneurs en carbone organique limitées.**

Les apports de PRO ne sont pas suffisants pour augmenter la diversité fonctionnelle des organismes des sols et ainsi avec leurs capacités à assurer un ensemble de fonctions plus diverses. Une limitation des perturbations physiques et chimiques des sols semble également nécessaire (réduction de la fréquence du travail du sol, des périodes de sol nu, pesticide, allongement des rotations, couverts végétaux...).

Remerciements :

L'ensemble des analyses ont été effectuées avec le financement GRAINE (ADEME), projet PROTERR dirigé par Sabine Houot. Les auteurs tiennent l'ensemble des partenaires du projet et plus particulièrement les gestionnaires de sites pour les informations transmises sur l'historique et les pratiques : Denis Montenach (PROSPECTIV), Thierry Morvan (EFELE), Camille Resseguier (Quali'Agro), Frederic Freder (La Mare) ainsi que les partenaires de la tâche 3.3 (Indicateur de la qualité de la matière organique) et 3.4 (indicateurs biologiques) du projet avec qui les échanges ont permis une meilleure interprétation des résultats : Sophie Bourgeteau- Sadet (UMR AgroEcologie), Céline Pelosi et Nathalie Cheviron (UMR ECOSYS), Pierre barré et Lauric Cécillon (ENS).

Bibliographie

- Akhtar, M., & Malik, A. (2000). Roles of organic soil amendments and soil organisms in the biological control of plant-parasitic nematodes: a review. *Bioresource Technology*, 74(1), 35-47.
- Bongers, T., & Bongers, M. (1998). Functional diversity of nematodes. *Applied soil ecology*, 10(3), 239-251.
- Bongers, T., & Ferris, H. (1999). Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(6), 224-228.
- Chauvin, C., Dorel, M., Villenave, C., Roger-Estrade, J., Thuries, L., & Risède, J. M. (2015). Biochemical characteristics of cover crop litter affect the soil food web, organic matter decomposition, and regulation of plant-parasitic nematodes in a banana field soil. *Applied Soil Ecology*, 96, 131-140.
- Coll, P., Le Cadre, E., & Villenave, C. (2012). How are nematode communities affected during a conversion from conventional to organic farming in southern French vineyards?. *Nematology*, 14(6), 665-676.
- DuPont, S. T., Ferris, H., & Van Horn, M. (2009). Effects of cover crop quality and quantity on nematode-based soil food webs and nutrient cycling. *Applied soil ecology*, 41(2), 157-167.
- Ferris, H., & Bongers, T. (2006). Nematode indicators of organic enrichment. *Journal of nematology*, 38(1), 3.
- Ferris, H., Bongers, T., & de Goede, R. G. (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied soil ecology*, 18(1), 13-29.
- Henneron, L., Bernard, L., Hedde, M., Pelosi, C., Villenave, C., Chenu, C., ... & Blanchart, E. (2015). Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 169-181.
- Levavasseur, F., Mary, B., & Houot, S. (2021). C and N dynamics with repeated organic amendments can be simulated with the STICS model. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 119(1), 103-121.
- Liu, T., Chen, X., Hu, F., Ran, W., Shen, Q., Li, H., & Whalen, J. K. (2016). Carbon-rich organic fertilizers to increase soil biodiversity: Evidence from a meta-analysis of nematode communities. *Agriculture, ecosystems & environment*, 232, 199-207.
- Milkereit, J., Geisseler, D., Lazicki, P., Settles, M. L., Durbin-Johnson, B. P., & Hodson, A. (2021). Interactions between nitrogen availability, bacterial communities, and nematode indicators of soil food web function in response to organic amendments. *Applied Soil Ecology*, 157, 103767.
- Sabine Houot, Marie-Noëlle Pons, Marilys Pradel, Anaïs Tibi (coord.), Christine Aubry, Laurent Augusto, Rémi Barbier, Pierre Benoît, Hubert Brugère, Marc-Antoine Caillaud, Magali Casellas, Alexandra Chatelet, Patrick Dabert, Sybille De Mareschal, Isabelle Doussan, Claire Etrillard, Jacques Fuchs, Sophie Générumont, Laure Giamberini, Arnaud Hélias, Emilie Jardé, Sophie Le Perche, Sylvie Lupton, Nicolas Marron, Safya Ménasseri, Alain Mollier, Christian Morel, Christian Mougin, Christophe Nguyen, Virginie Parnaudeau, Dominique Patureau, Anne-Marie Pourcher, Guido Rychen, Isabelle Savini, Erik Smolders, Edward Topp, Laure Vieublé, Catherine Viguié, 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier, impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective, rapport, INRA-CNRS-Irstea (France) 930p.
- Trap, J., Bonkowski, M., Plassard, C., Villenave, C., & Blanchart, E. (2016). Ecological importance of soil bacterivores for ecosystem functions. *Plant and Soil*, 398(1-2), 1-24.
- Van Den Hoogen, J., Geisen, S., Routh, D., Ferris, H., Traunspurger, W., Wardle, D. A., ... & Bardgett, R. D. (2019). Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature*, 572(7768), 194-198.
- Villenave, C., Jimenez, A., Guernion, M., Pérès, G., Cluzea, D., Mateille, T., ... & Tavoillot, J. (2013). Nematodes for soil quality monitoring: results from the RMQS BioDiv programme.