

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/320240964>

Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique

Book · January 2014

CITATIONS

3

READS

3,482

11 authors, including:



Alain Bouthier

ARVALIS Institut du végétal

40 PUBLICATIONS 663 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Céline Pelosi

French National Institute for Agriculture, Food, and Environment (INRAE)

122 PUBLICATIONS 1,831 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Cécile Villenave

ELISOL environnement

167 PUBLICATIONS 3,360 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Guénola Pérès

Université de Rennes 1

114 PUBLICATIONS 2,159 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Land restoration in tea garden [View project](#)



PRECIOUS: Predicting water flow through new earthworm functional groups [View project](#)

Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique

A. Bouthier (ARVALIS - Institut du végétal), C. Pelosi (INRA), C. Villenave (ELISOL), G. Peres (INRA Agrocampus), M. Hedde (INRA), L. Ranjard (INRA), J. F. Vian (ISARA), J. Peigne (ISARA), J. Cortet (UMR-C), A. Bispo (Ademe), D. Piron (UMR - Ecobio)

Les écosystèmes terrestres ne sont pas verts... ils sont bruns (D. Wall, 2008). En effet, la plus grande partie de la biodiversité tellurique est trouvée dans les sols : il est estimé que les sols hébergent environ 25 % du quelque 1,5 million d'espèces vivantes décrites à ce jour (Decaëns *et al.*, 2006 ; Decaëns *et al.*, 2008). Par ailleurs, les communautés des sols contiennent des représentants de tous les principaux taxons terrestres et leur richesse spécifique est sans commune mesure avec celle de la végétation et des faunes épigées.

Pour la France, des données récentes (tableau 1) permettent d'illustrer tant la diversité que l'abondance de la vie dans des sols cultivés ou prairiaux.

Tableau 1. Abondance et diversité des principaux groupes d'organismes du sol (0-15 cm) sous grandes cultures et prairies dans les sols de Bretagne (adapté de Cluzeau *et al.*, 2011, programme ADEME, RMQS-BioDiv)

Paramètres biologiques	Cultures ¹			Prairies		
	Premier quartile	Troisième quartile	Moyenne	Premier quartile	Troisième quartile	Moyenne
Biomasse microbienne (mg C g ⁻¹ sol)	0,20	0,29	0,25	0,33	0,45	0,43
ADNr 16S (nombre de copies mg ⁻¹ ADN du sol)	25,8	84,1		46,2	156,9	
Abondance des nématodes (ind g ⁻¹ sol sec)	8,8	16	13,2	10,8	29,1	20,6
Diversité taxonomique (nbre de familles) des nématodes	14	17,3		12,8	20,5	
Abondance des acariens (ind m ⁻²)	1415	6013	4756	1769	9904	7835
Abondance des collemboles (ind m ⁻²)	1768	14149	9810	1668	14060	12103
Diversité taxonomique (nbre d'espèces) des collemboles	1	5		2	5	
Abondance des vers de terre (ind m ⁻²)	86	320	215	175	447	350
Diversité taxonomique (nbre d'espèces) des vers de terre	6	9		8,5	11	
Abondance de la macrofaune totale du sol (ind m ⁻²)	167	637	456,6	435	853	678

¹ Le nombre de sites échantillonnés pour calculer ces valeurs est de 52 cultures et 47 prairies (sauf pour les collemboles et acariens où il est de 42 prairies et 47 cultures)

Ces organismes, tant par leur activité propre que par leurs interactions (notamment trophiques), contribuent au fonctionnement des sols. Ils peuvent être classés en fonction de leur taille mais également de leurs rôles, avec plus ou moins d'exactitude, dans les différentes catégories suivantes :

- Les ingénieurs des sols contribuent d'une part à la structure et à la cohésion des sols et d'autre part, à la fragmentation de la matière organique. La macro et méso-faune des sols, comme par exemple les fourmis, les lombriciens, les collemboles, les enchytréides appartiennent à cette catégorie. D'autres organismes microscopiques, comme les champignons ou les bactéries, par leur synthèse de molécules organiques, «cimentent» les sols et permettent sa cohésion.
- Les chimistes des sols (bactéries et champignons) contribuent à la dégradation de la matière organique et au recyclage des nutriments.
- Les régulateurs des sols qui contribuent au contrôle, notamment par la prédation, des populations d'organismes. Les nématodes, les acariens et les carabes par exemple limitent la prolifération de communautés parfois nuisibles et maintiennent des équilibres dans les sols. Ainsi par exemple, les carabes permettent de réduire les populations de limaces dans les parcelles cultivées.

Bien évidemment, les organismes des sols ne peuvent être réduits à une seule de ces catégories, par leur activité ils interagissent entre eux mais également avec le sol et la litière: certains vers de terre par exemple auront une activité fousseuse plus marquée (ex : certains vers anéciques tels que *Lumbricus terrestris*, ou encore les vers endogés tels que *Aporrectodea caliginosa*) alors que d'autres participent plus à la fragmentation de la matière organique (ex : vers épigés tels que *Eisenia fetida*). D'un point de vue fonctionnel, il est donc important de connaître non seulement la diversité des communautés et leur abondance, mais également leurs traits fonctionnels, c'est-à-dire leur biologie (morphologie, physiologie, etc.), leur comportement (alimentaire, fousseur, compétition entre organismes ou mutualisme, etc.) et leurs préférences d'habitat. Cet ensemble d'informations permet de représenter la contribution des organismes du sol au fonctionnement global du milieu et à terme, d'évaluer les services écosystémiques rendus par la biodiversité tellurique.

Cette notion de services écosystémiques s'est imposée suite au Millenium Ecosystem Assessment (MEA) (2005). Bien que présentant une vision utilitaire (voire utilitariste) des écosystèmes, cette notion permet de faciliter la communication vers le public. Il est ainsi plus aisé d'expliquer l'intérêt des galeries verticales des vers de terre pour la régulation des flux d'eau en facilitant son infiltration dans le sol ou la dégradation de la matière organique pour la fourniture de nutriments pour les plantes. En quelque sorte, cela légitime (notamment aux yeux du grand public et des décideurs) l'intérêt de travailler sur ces organismes car bien qu'ayant ou pas une utilité pour l'homme, ces écosystèmes fonctionnent. Quatre types de services fournis par les écosystèmes ont été définis dans le MEA : services d'approvisionnement, services de régulation, services culturels et services de soutien des écosystèmes. Les organismes du sol contribuent à l'ensemble de ces services (bien que la fourniture de services culturels soit beaucoup moins décrite et fasse l'objet

de moins de travaux de recherche). Le tableau 2 illustre les liens entre les services, le fonctionnement des sols et les organismes biologiques.

Tableau 2. Services écosystémiques assurés par les sols en relation avec les processus et les fonctions et exemple d'organismes fournissant ces services (adapté de Haygarth et Ritz, 2009)

	Services écosystémiques	Biens associés, processus et fonctions	Exemples de contribution
SOUTIEN	Formation des sols	Altération du matériau parental et processus pédogénétiques	Lichens
	Production primaire	Directe : Fixation du carbone Indirecte : Interactions avec les plantes vasculaires	Cyanobactéries
	Cycle du carbone et des éléments nutritifs	Biodégradation de la matière organique Transformations de l'azote et du phosphore	Macrofaune Nombreux protozoaires, nématodes Nombreux bactéries, archées et champignons
APPROVISIONNEMENT	Plate-forme	Stabilité structurale du sol	De nombreux microorganismes les vers de terre et d'autres organismes de la macrofaune
	Stockage de l'eau	Dynamique de la structure du sol (porosité)	
	Habitat		
	Biodiversité/ ressources génétiques	Réservoir de processus d'adaptation et d'évolution Source de nouveaux composés pharmaceutiques	L'ensemble de la biocénose du sol
	Approvisionnement alimentaire	Via la production primaire, champignons comestibles	
REGULATION	Régulation de la qualité de l'eau	Purification via: la dynamique de la structure (porosité), la dynamique de la dégradation des xénobiotiques et des agents pathogènes	De nombreux organismes ex. via l'adhésion bactérienne, le pontage fongique, le creusement de galeries et la restructuration du sol...
	Régulation de l'approvisionnement en eau	Dynamique de la structure du sol (porosité)	
	Contrôle de l'érosion	Dynamique de la structure du sol Stabilisation de la structure du sol	
	Régulation biologique	Réseaux trophiques Contrôle des bio-agresseurs: parasitisme et prédation	L'ensemble de la biocénose du sol
	Régulation des gaz atmosphériques et du climat	Régulation des gaz à effet de serre	L'ensemble de la biocénose du sol
	CULTUREL	Cognitif	Via le système-sol qu'il sous-tend Espèces charismatiques
Récréatif		Par les terrains sportifs et les espaces verts	
Educatif		Ressources pédagogiques et potentiel	
Santé et bien-être		Liens avec le système-sol dans sa globalité et services	
Patrimoine		Interactions avec l'archéologie	

Malgré cette contribution fondamentale au fonctionnement des sols et à la fourniture de nombreux services écosystémiques, les organismes du sol n'ont, jusqu'à une période assez récente, fait l'objet que de peu de travaux. Cependant, depuis environ 20 ans, les progrès réalisés au niveau des méthodes d'analyse et des outils, ont permis de mieux caractériser la biodiversité des sols et de déchiffrer les interactions entre les organismes et leurs implications dans le fonctionnement des sols. Ainsi, sur plusieurs sites expérimentaux comparant différentes pratiques de travail du sol couplées ou non à d'autres pratiques culturales, des analyses et des suivis de la biodiversité et de l'activité des organismes du sol ont été réalisés afin de progresser sur la connaissance des effets du labour et des techniques simplifiées de travail du sol, voire de sa suppression (ex : semis direct).

1. Les effets du travail du sol sur les organismes vivants dans le sol

1.1. Les modifications de propriétés liées au travail du sol à l'origine des effets sur son fonctionnement biologique

Le travail du sol modifie les propriétés structurales du sol, sa porosité et la répartition des matières organiques fraîches restituées ou apportées. Il affecte ainsi les organismes du sol directement en les blessant, les tuant ou en les exposant au risque de prédation (Roger-Estrade *et al.*, 2010) et indirectement en modifiant leur habitat et la localisation des sources d'éléments nutritifs. La diminution de la taille des pores va affecter les organismes en fonction de leur taille. L'existence d'un mulch de débris végétaux en surface va constituer un abri et limiter l'exposition des organismes à la sécheresse. Les conditions d'aération, de température, d'humidité et de pénétrabilité par les racines (Huwe, 2003) qui sont indirectement modifiées par le travail du sol, impactent également les habitats des organismes.

Le travail du sol modifie donc l'écosystème du sol en modifiant la diversité des espèces, leurs abondances et leurs activités (Altieri, 1999), de façon plus ou moins importante selon sa fréquence et son intensité (degré de fragmentation et profondeur de travail). Ces effets sur les organismes vivants du sol se traduisent par des modifications de services écosystémiques (figure 1).

Ces changements peuvent être bénéfiques pour la production lorsqu'ils favorisent par exemple le développement d'organismes auxiliaires (e.g. carabes) ou des ingénieurs du sol (e.g. vers de terre) ou néfastes lorsqu'ils provoquent une augmentation des populations de ravageurs (e.g. limaces). Les autres éléments techniques de gestion des systèmes de culture (rotation des cultures, matière organique, utilisation de pesticides...) peuvent modifier les réponses des organismes du sol au travail du sol. Il est toutefois possible de faire ressortir les effets spécifiques du travail du sol sur ces organismes. De nombreuses études montrent qu'en règle générale, une baisse de l'intensité des interventions mécaniques augmente la densité et la diversité des organismes du sol, même si cette réponse peut être très variable selon les espèces considérées (Kladivko, 2001).

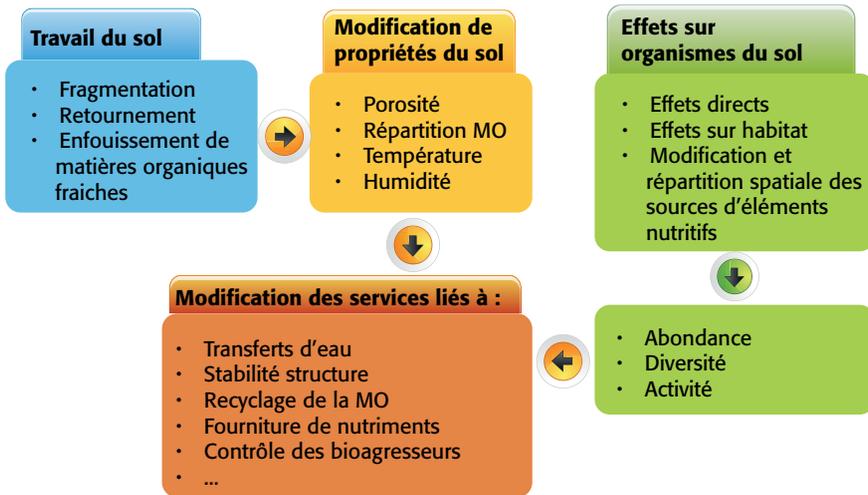


Figure 1 : Schéma conceptuel des effets du travail du sol sur les organismes vivants du sol, les fonctions et services écosystémiques.

1.2. Bilan des connaissances sur les effets du travail du sol sur les différents types d'organismes

1.2.1. Travail du sol et microorganismes du sol

Le travail du sol agit sur l'environnement physique et biotique des microorganismes du sol et modifie en retour leur abondance, leur diversité et leurs activités au sein du profil de sol.

De nombreuses références sont disponibles sur ce thème et montrent que dans les systèmes non travaillés ou travaillés superficiellement, la quantité et l'activité des microorganismes du sol présentent une forte stratification verticale tandis qu'elles sont réparties de façon plus homogènes sur la profondeur de la couche de sol labourée (Andrade *et al.*, 2003) (figure 2).

La biomasse microbienne est significativement supérieure dans les premiers centimètres du sol (0-10 cm) dans les régimes de travail du sol réduit ou superficiel par rapport aux systèmes labourés et devient inférieure ou égale dans les horizons sous-jacents (Andrade *et al.*, 2003; Wright *et al.*, 2005). En effet, l'enfouissement partiel des résidus de culture dans ces régimes non labourés limite la surface de contact entre les substances organiques et les particules minérales du sol ce qui réduit la vitesse de minéralisation de ces résidus (Balesdent *et al.*, 2000). Paradoxalement, la minéralisation du C et N en surface dans les régimes de travail réduit ou superficiel (0-5 à 0-10 cm, selon la profondeur travaillée) est supérieure par rapport aux régimes labourés car ces régimes de travail réduit ou superficiel ont en général une plus grande proportion de matières organiques qui présentent un turn-over plus rapide (Balesdent *et al.*, 2000; Oorts, 2006). En revanche, en profondeur, ce rapport s'inverse. Le travail du sol, par l'enfouissement des résidus

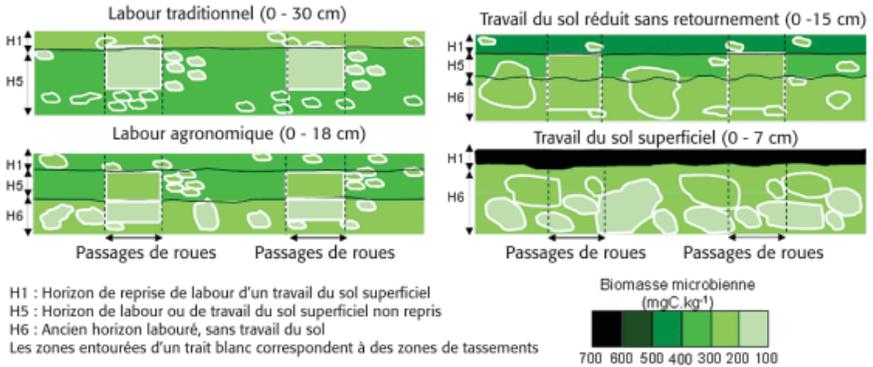


Figure 2 : Influence de la profondeur et du type de travail du sol sur la biomasse microbienne et sa répartition au sein du profil cultural (0-30 cm). Site expérimental de Thil où sont comparées différentes régimes de travail du sol en agriculture biologique - ISARA-Lyon (Vian, 2009).

de cultures, crée des conditions favorables à la croissance microbienne et stimule l'activité de minéralisation des résidus de culture et de la matière organique du sol (Grigera *et al.*, 2007; Pekrun *et al.*, 2003; Young et Ritz, 2000). Ainsi, lorsqu'on rapporte les activités de minéralisation du carbone et de l'azote à l'ensemble de la couche de sol, peu ou aucunes différences ne sont observées entre les régimes de travail du sol (Oorts *et al.*, 2007; Pekrun *et al.*, 2003). La quantité et l'activité des microorganismes suivent en règle générale la stratification de la matière organique dans les sols.

Le travail du sol modifie également la structure des communautés microbiennes du sol (Andrade *et al.*, 2003). Dans les systèmes les moins perturbés mécaniquement, l'augmentation de la biomasse microbienne en surface serait majoritairement due à l'expansion de la biomasse fongique, favorisée par l'humidité du sol (maintenue grâce à la présence d'un mulch) et non affectée par les perturbations mécaniques qui réduisent la longueur des hyphes mycéliens et le nombre de propagules dans les premiers horizons de sol (Spedding *et al.*, 2004). Le type d'outil utilisé pour le travail du sol a également une influence sur les populations microbiennes : il semblerait que les outils animés (herse rotative) aient un effet encore plus délétère pour les populations fongiques qu'un labour (Cookson *et al.*, 2008) car ils seraient plus à même d'entraîner des dommages tissulaires importants sur les communautés fongiques (Helgason *et al.*, 2009). Les sols travaillés intensivement seraient donc dominés par des espèces bactériennes tandis que ceux dans lesquels le travail du sol est limité favoriseraient le développement de populations fongiques (Kladivko, 2001; Young et Ritz, 2000).

Il apparaît également que le travail du sol affecte plus particulièrement certains groupes microbiens, comme les populations nitrifiantes ou les champignons mycorhiziens. Ces derniers sont plus abondants dans les systèmes les moins perturbés (Drijber *et al.*, 2000) et la communauté des bactéries nitrifiantes est plus diversifiée dans les systèmes non travaillés (Ibekwe *et al.*, 2002). Par ailleurs, il semblerait que les systèmes non travaillés favorisent le développement d'espèces anaérobies

dans les couches de sol qui ne sont plus fragmentées par les outils (Drijber *et al.*, 2000), tandis que les sols labourés sont dominés par des espèces microbiennes aérobies avec une haute activité métabolique (Spedding *et al.*, 2004). Cependant, l'influence du travail du sol sur la structure des communautés microbiennes est souvent masquée par les variations saisonnières et surtout par l'effet "tampon" de la rhizosphère du sol qui ont en général un effet plus important sur la structure des communautés microbiennes que le travail du sol (Drijber *et al.*, 2000; Spedding *et al.*, 2004). Les sols labourés semblent toutefois présenter une diversité génétique microbienne moins importante que les sols labourés (Drijber *et al.*, 2000; Ibekwe *et al.*, 2002).

1.2.2. Travail du sol et micro, méso et macrofaune du sol

Le travail du sol peut également modifier les communautés de la faune du sol, que ce soit la microfaune du sol (protozoaires, nématodes), la mésofaune du sol (acariens, collembolés...) ou encore la macrofaune du sol (vers de terre, carabes, limaces...).

La réduction du travail du sol favorise en général la densité totale des nématodes. Dans certaines situations, et notamment en semis direct sous couvert vivant, on peut observer une augmentation des densités de nématodes phytophages ainsi que des nématodes omnivores et prédateurs. Cependant, d'autres études ont également montré que des systèmes sans labour avec résidus de récolte présentaient des densités de nématodes phytoparasites plus faibles qu'en situation labourée (Govaerts *et al.*, 2006). Le travail du sol conduit souvent à une simplification qualitative de la micro-chaîne trophique du sol (réduction de nombre d'espèces de nématodes). Les systèmes en semis direct présentent une nématofaune plus complexe et moins opportuniste incluant des taxons sensibles aux perturbations contrairement au système labouré, comme les nématodes prédateurs par exemple (Villenave *et al.*, 2009).

Les collembolés, avec les acariens, sont les microarthropodes les plus abondants des sols (100 000 individus par m²) (Coleman *et al.*, 2004). À l'heure actuelle, seules 6 000 espèces de microarthropodes sont connues (Jeffery *et al.*, 2010). Les acariens se rencontrent majoritairement au sein des matières organiques du sol en décomposition (Coleman *et al.*, 2004). Ils peuvent être détritivores (se nourrissent de matière organique en décomposition, présente de manière importante dans les litières), prédateurs (arthropodes, microorganismes...) ou parasites des végétaux. Les collembolés, quant à eux, sont stratifiés par espèces au sein du profil de sol et peuvent se retrouver jusqu'à 1,50 m de profondeur (Jeffery *et al.*, 2010). Cependant, ils semblent plus importants dans les 30 premiers centimètres du sol, notamment dans la rhizosphère (Coleman *et al.*, 2004).

Le labour semble affecter les microarthropodes du sol par une perturbation physique du sol (mortalité lors du labour, emprisonnement des organismes dans des mottes de terres, modifications du régime hydrique et de la température du sol) et par l'enfouissement des résidus de cultures (perte en surface) (Kladivko, 2001). Toutefois, les réponses des populations de microarthropodes au travail du sol sont plus variées et plus extrêmes suivant les groupes auxquels ils appartiennent.

Par exemple, les différents groupes taxonomiques d'acariens semblent répondre différemment aux effets du labour conventionnel. Une étude conduite sur 3 ans par l'ACTA a comparé le nombre moyen de microarthropodes, dont les acariens, dans des parcelles labourées et non labourées. Cette étude a mis en évidence que les populations d'acariens oribates et mésostigmates semblaient être modérément à extrêmement inhibées par le labour conventionnel, comparé au non-labour. Il semblerait que l'accumulation de débris végétaux à la surface des sols (dû au non-labour) favorise leur expansion (Chabert, [sd]). La réponse au travail du sol des autres populations d'acariens est plus nuancée. Les astigmatés sont soit inhibés, soit stimulés par le labour. Ils semblent se remettre beaucoup plus rapidement des effets d'un labour. Cela est dû à une stratégie de reproduction rapide, ils peuvent alors coloniser intensément toutes les niches devenues disponibles. Cette même étude a également montré que les populations de microarthropodes étaient plus importantes au sein de la rhizosphère des parcelles non labourées par rapport aux parcelles labourées. Les collembolés, quant à eux, sont généralement inhibés par le labour conventionnel (Kladivko, 2001) de façon plus ou moins forte selon leur habitat (profondeur).

L'abondance des microarthropodes semble donc être affectée par l'enfouissement des résidus de culture et une perturbation physique du sol. Le non-labour tend à rendre les sols plus stables et à favoriser le développement des décomposeurs des sols, notamment en surface du sol, là où les résidus de cultures s'accumulent (Coleman *et al.*, 2004).

Les enchytréides (petits annélides), qui ont un rôle semblable à celui des vers de terre mais à plus petite échelle (van Vliet *et al.*, 1993), présentent une réponse relativement contrastée au travail du sol. Certains auteurs trouvent une diminution de l'abondance des enchytréides en parcelles non labourées (van Capelle *et al.*, 2012). Les auteurs expliquent eux-mêmes que cela contredit l'hypothèse communément acceptée selon laquelle ces organismes ne seraient pas affectés par le travail du sol, en raison de leur petite taille et de leur rapidité de reproduction (Didden *et al.*, 1994). Cependant, un effet positif de l'arrêt du travail du sol est mis en évidence par d'autres auteurs (Parmelee *et al.*, 1980 ; Fujita et Fujiyama, 2001 ; Miura *et al.*, 2008), principalement dans les premiers centimètres de sol. La distribution verticale des enchytréides dépend en effet pour beaucoup de la disponibilité en matière organique. Ils sont donc généralement localisés dans les 5 premiers cm de sol en non-labour et sur les 20 premiers cm en parcelles labourées (van Vliet *et al.*, 1997). Les enchytréides peuvent ne pas être affectés directement par le travail du sol, mais bénéficier de la dynamique positive d'un autre groupe (eg vers de terre) suite à la modification du travail du sol et ce par différents mécanismes pas uniquement trophiques. Les enchytréides restent cependant assez peu étudiés comparativement aux autres groupes de la faune du sol, certainement en raison de la difficulté d'identification des individus à l'espèce.

La diminution de l'intensité du travail du sol favorise en général le développement de la macrofaune du sol qui semble plus affectée par le travail du sol que les organismes de plus petite taille. Les perturbations physiques et la diminution du

mulch à la surface du sol limitent en général le développement de la macrofaune du sol (Kladivko, 2001) (Figure 3).

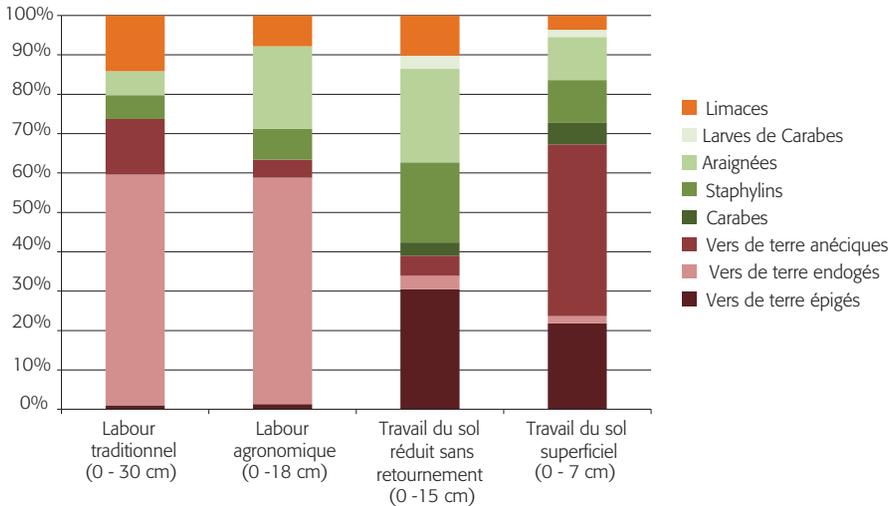


Figure 3 : Influence de la profondeur et du type de travail du sol sur quelques groupes de la faune du sol. Site expérimental de Thil où sont comparées différentes méthodes de travail du sol en AB - ISARA-Lyon. Programme Bioindicateurs 2 de l'ADEME (Vian, 2011).

Cependant, la réponse de la macrofaune au travail du sol est très dépendante des espèces présentes, notamment en ce qui concerne la faune épigée, souvent composée d'auxiliaires des cultures (carabes, staphylin et araignées). Par exemple la revue bibliographique de Holland et Reynolds (2003) montre une plus grande abondance et une plus grande diversité de carabes dans les parcelles conduites en non-labour, mais les travaux de Holland et Luff (2000) montrent que cette réponse est variable selon les espèces. Ces derniers auteurs dénombrent ainsi que sur 47 espèces de carabes étudiées, 21 sont fortement inhibées par le labour, 20 sont plus abondantes en labour et 6 ne semblent pas perturbées par le type et l'intensité de travail du sol. Les staphylin, en revanche, semblent moins sensibles au travail du sol que les carabes, à l'inverse des araignées, dont la densité et la diversité de population augmentent dans les parcelles non labourées (Holland et Reynolds, 2003). Cependant, la présence d'un mulch en surface en agriculture de conservation procure également un habitat propice car protecteur pour les ravageurs des cultures et notamment pour les limaces (Peigné *et al.*, 2007). Ainsi Glenn et Symondson (2003) ont montré que les dégâts occasionnés par les limaces sur les cultures augmentent dans les parcelles non labourées.

L'effet du labour sur les vers de terre a été largement étudié. En général, la biomasse et l'activité des vers de terre augmentent dans les systèmes de conservation par rapport aux systèmes labourés. Le labour peut détruire l'habitat des vers de terre, notamment des espèces anéciques, et les expose aux prédateurs et à la dessiccation. De plus, l'augmentation des résidus de cultures en surface constitue une réserve trophique pour certaines espèces de vers de terre et stimule leur activité fousseuse

(Kladivko, 2001; Peigné *et al.*, 2007). Le nombre de biopores verticaux est donc favorisé par l'absence de travail du sol et peut atténuer à long terme l'effet de l'absence de fragmentation des anciennes couches de sol labourées. Les vers de terres épigés qui vivent à la surface du sol sont quasiment absents des parcelles cultivées. Le labour, par l'enfouissement des résidus de culture peut expliquer cette absence, tout comme l'utilisation de produits phytosanitaires (Pelosi *et al.*, 2013). Les vers de terre endogés ne semblent pas être affectés par le labour (Figure 2) et peuvent même être favorisés par l'enfouissement des résidus de culture (Pelosi *et al.*, 2009).

2. Les effets du travail du sol se conjuguent avec ceux d'autres pratiques culturelles associées au travail du sol

2.1. Travail du sol couplé à différents types de fertilisation, organique ou minérale

2.1.1. *Le contexte expérimental*

Dans un contexte breton, où les surfaces conduites en TCSL (intégrant les absences occasionnelles de labour) ont atteint 26 % des surfaces régionales d'après les enquêtes « Techniques culturelles » de 2011 (Terra, 2014), la gestion des effluents d'élevage est une problématique qui vient s'ajouter à l'effet des pratiques sans labour. Ainsi, afin de répondre aux questionnements des agriculteurs sur les effets de la réduction du travail du sol et de la fertilisation, tant sur les propriétés du sol que sur le comportement des cultures, la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne a mis en place en 2000 l'essai agronomique de Kerguéhennec, sur la commune de Bignan (Morbihan). Cet essai permet de comparer 3 techniques de travail du sol (L : labour à 25 cm, TS : travail superficiel réalisé au chisel à 8 cm de profondeur sans retournement, SD : semis direct) associées à différents types de fertilisation (M : engrais minéral, FB/CM : fumier de bovins apporté tous les 4 ans en alternance avec une fertilisation minérale, FV : fumier de volailles, LP : lisier de porcs, ces deux dernières fertilisations étant complétées par des apports azotés permettant de compenser leur déficit en azote). Cet essai est conduit sur une rotation sur 4 ans (maïs-blé-colza-blé). Un grand nombre de paramètres sont régulièrement mesurés sur ce dispositif dont les abondances des communautés lombriciennes.

2.1.2. *Le travail du sol : un impact négatif sur les lombriciens qui peut être compensé par une fertilisation organique*

Les résultats, obtenus après 7 ans d'étude, montrent que les épigés, petits vers de surface, sont quasiment absents quel que soit le traitement, corroborant les résultats régulièrement trouvés en système cultivé qui soulignent la forte sensibilité de ces individus aux pratiques agricoles (figure 4) (Pérez *et al.*, 2011). Sous fertilisation minérale, la réduction du travail du sol favorise de manière significative les abondances lombriciennes, et particulièrement sous semis direct. Cet effet positif est d'autant plus notable pour les anéciques, individus de grande taille menacés

tant par l'action de la charrue que par la destruction annuelle de leur habitat (Rovira *et al.*, 1987 ; Lee and Foster, 1991 ; Pérès *et al.*, 2011). Sous fertilisation organique, la réponse biologique à la réduction du travail du sol est variable, soulignant les fortes interactions entre les facteurs mécaniques et chimiques. Les apports de fumier de bovin tous les quatre ans en alternance avec une fertilisation minérale ne favorisent pas le développement des communautés lombriciennes, que ce soit en labour ou en travail superficiel. Les apports annuels de lisier de porcs et de fumier de volailles permettent le développement des lombriciens et particulièrement des endogés, quel que soit le travail du sol : ces individus, qui vivent dans le sol (Bouché, 1972), bénéficieraient de la matière organique enfouie dans le sol par les actions mécaniques (labour et travail du sol superficiel) (Chan, 2001) ou biologiques (action des anéciques) (Lowe and Butt, 2003). Il apparaît donc que l'action mécanique liée à la réduction du travail du sol impacte la structure des communautés en favorisant les anéciques qui, d'un point de vue fonctionnel, aboutira à la formation de galeries verticales et à la production de turricules qui vont contribuer respectivement à améliorer la capacité d'infiltration (Bouché and Al-Assan, 1997 ; Shiptalo and Butt, 1999) et à réduire la vitesse de ruissellement et l'érosion (Le Bayon and Binet, 2001 ; Jouquet *et al.*, 2008). L'action fertilisante liée aux apports organiques va, quant à elle, bénéficier aux endogés, ce qui va devrait permettre d'améliorer la structure grumeleuse du sol et ainsi potentiellement la capacité de rétention en eau (Pérès *et al.*, 1998 ; Ehlers, 1975) et la stabilité structurale des sols (Bouché et Al-Addan, 1997). Ces actions sur les propriétés physiques du sol vont contribuer au service écosystémique de type régulation hydrique (Blouin *et al.*, 2013). La réduction du travail du sol apparaît donc comme un élément majeur de la restauration des communautés lombriciennes, mais elle doit se réfléchir conjointement avec les apports organiques (qualité des apports, fréquence des apports) qui sont tout aussi importants dans le fonctionnement du sol.

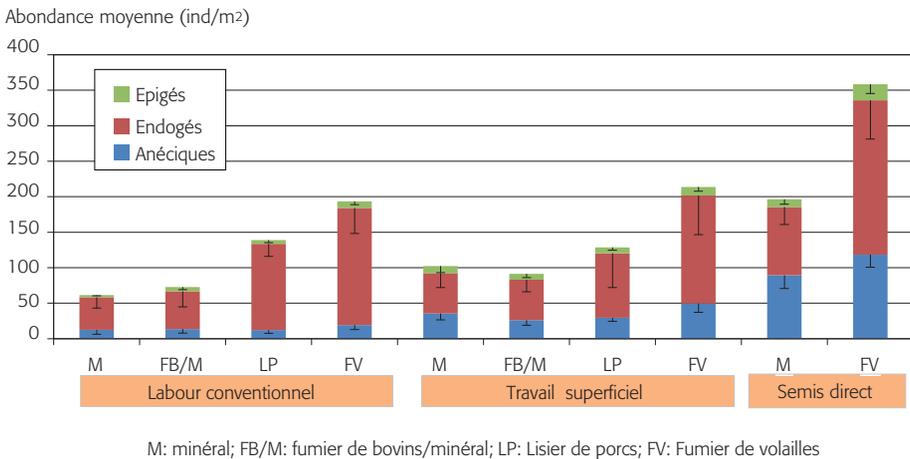


Figure 4 : Influence de la profondeur et du type de travail du sol croisés à différents types de fertilisation, sur l'abondance et la structure fonctionnelle des lombriciens (Piron et al, 2014).

2.2. Travail du sol couplé à la mise en place de couverts végétaux en période d'interculture

2.2.1. Le contexte expérimental

L'impact du travail du sol sur l'abondance et la diversité des communautés microbiennes a été évalué sur l'essai « environnement » d'ARVALIS, implanté sur la ferme de Boigneville (Essonne) depuis 1991. Ce site a été mis en place pour comparer le labour au semis direct et étudier les impacts de l'implantation de Cultures Intermédiaires Piège A Nitrate (CIPAN). Pour cette étude réalisée dans le cadre du programme SolAgri 2011-12 cofinancé par France AgriMer et le GIS GC HP2E, des outils issus de la biologie moléculaire et de la métagénomique environnementale, basés sur l'extraction et la caractérisation de l'ADN des sols, ont été appliqués afin de caractériser l'abondance et la diversité microbienne des sols (Maron *et al.*, 2011).

L'essai «environnement» compare un système avec travail du sol conventionnel tous les ans (labour à 23 cm de profondeur) et un système en semis direct sans travail du sol. Une rotation de cultures a été instaurée dès la mise en place de l'essai: pois de printemps (*Pisum sativum*), blé d'hiver (*Triticum aestivum*) et orge de printemps (*Hordeum vulgare*). Une CIPAN de moutarde (*Sinapis alba*) a été introduite pendant l'interculture entre l'orge de printemps et le pois, entre le blé et l'orge de printemps, et entre le pois et le blé pour la moitié des parcelles. Depuis l'été 2006, des changements ont été réalisés pour la moitié des traitements avec CIPAN, la moutarde a été remplacée par la lentille (*Lens nigricans*), une légumineuse. Depuis l'été 2010, les derniers traitements avec la moutarde en tant que culture intermédiaire ont été remplacés par des traitements avec une autre crucifère, le radis chinois (*Raphanus sativus var. longipinnatus*). Pour finir, depuis 2012, le pois de printemps a été remplacé, dans la rotation, par la féverole d'hiver (*Vicia faba*).

Parmi les traitements existants, 6 ont été choisis pour notre étude : T1, T5, T6, T7, T8 et T10 (figure 5). De plus, des échantillons de sol nu (SN) ont également été prélevés entre les parcelles à 3 endroits différents de l'essai (zones en marge des parcelles expérimentales, maintenues en sol nu par un entretien chimique avec du glyphosate).

Les prélèvements de sols ont été réalisés sur l'horizon 0-20 cm. Huit prélèvements ont été effectués entre mai 2011 et juillet 2012 afin d'étudier en parallèle la variabilité temporelle des analyses microbiologiques des sols.

Les communautés bactériennes et fongiques ont été caractérisées par des outils de biologie moléculaire relevant de la métagénomique environnementale. L'abondance microbienne a ainsi été appréhendée par la mesure de la quantité d'ADN extrait des sols (Biomasse moléculaire microbienne, Dequiedt *et al.*, 2011) et la diversité a été mesurée par le séquençage massif des séquences taxonomiques microbiennes, directement à partir de l'ADN extrait du sol (Terrat *et al.*, 2012). Ces approches permettent d'estimer avec robustesse le nombre d'espèces (richesse) et l'équilibre entre les espèces microbiennes (équité). Ces séquences sont analysées par des outils de bioinformatiques et de biostatistiques pour déduire des

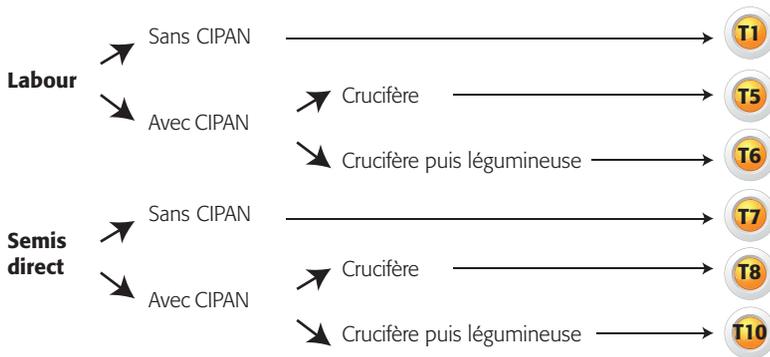


Figure 5 - Description simplifiée des différents traitements retenus pour l'essai «environnement».

indices de diversité (comme l'indice de Shannon, qui intègre la richesse en espèces et l'équitabilité entre les espèces). De plus, grâce aux bases de données internationales il est maintenant possible d'identifier taxonomiquement les espèces présentes et donc d'appréhender la composition microbienne d'un sol et sa qualité (Maron *et al.*, 2011).

2.2.2. Le travail du sol : un impact négatif et stable sur la biomasse microbienne qui peut être compensé par les CIPAN.

La biomasse moléculaire microbienne a été mesurée sur toutes les modalités étudiées et à huit dates de mai 2011 à juillet 2012. La figure 6 représente les mesures de biomasse cumulées et moyennées pour toutes les dates étudiées et pour chacune des pratiques appliquées.

Les résultats montrent que la biomasse microbienne la plus faible est trouvée dans le sol maintenu nu depuis 20 ans. Ceci corrobore l'hypothèse selon laquelle l'absence de couvert végétal sur un sol entraîne une baisse significative de la vie du sol et donc de la biomasse microbienne. La comparaison des modalités de travail du sol révèle une biomasse microbienne significativement plus faible dans le labour (environ 25 %) en comparaison du semis direct (T5 vs T7). Ceci confirme l'effet négatif du travail du sol sur l'abondance des microorganismes. Ceci peut s'expliquer notamment par une altération des habitats microbiens (notamment les macroagrégats qui représentent des habitats pour les champignons) et/ou du statut trophique du sol (teneur et qualité de la matière organique).

La présence de CIPAN stimule la biomasse microbienne (+25 %) de façon significative, pour les deux modalités de travail du sol. Ces observations confirment l'hypothèse selon laquelle l'implantation répétée de couverts végétaux entretient une vie microbienne plus importante. De plus, il est intéressant de noter que la stimulation de la biomasse microbienne par les CIPAN est observée quelle que soit la date d'échantillonnage et donc même à des périodes de l'année où les CIPAN sont absentes. Il est donc possible de déduire que l'effet cumulé des CIPAN depuis 20 ans stimule la biomasse microbienne de façon pérenne.

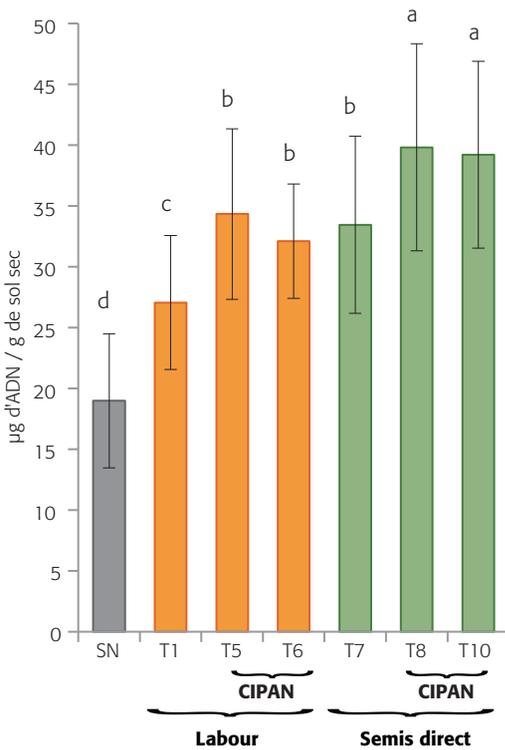


Figure 6 : Estimation de la biomasse moléculaire microbienne dans l'horizon 0-20 cm du site de Boigneville selon différentes pratiques agricoles (sol nu vs travail du sol vs semis direct, avec et sans CIPAN).

Une analyse détaillée de la biomasse microbienne pour chaque modalité et à toutes les dates échantillonnées montre que, malgré des petites variations saisonnières de la biomasse microbienne (+/- 15 %), les modifications observées ainsi que la hiérarchie entre les pratiques de travail du sol et de CIPAN sont stables dans le temps. Ceci confirme donc que la biomasse microbienne est un indicateur robuste et applicable tout au long de l'année pour détecter l'impact des pratiques agricoles sur les communautés microbiennes du sol.

2.2.3. Impact différentiel du travail du sol sur la diversité bactérienne et de champignons.

La comparaison de la diversité microbienne entre les modalités de travail du sol (figure 7) révèle une plus grande diversité bactérienne en labour et une plus grande diversité de champignons en non-labour. Cette réponse différentielle de la diversité bactérienne et de champignons au travail du sol peut s'expliquer notamment par des sensibilités différentes à cette pratique. Les champignons sont connus pour être sensibles aux agressions physiques du labour. En effet, cette technique peut altérer directement l'intégrité de leur mycélium mais aussi modifier l'état structural du sol et notamment mener à la destruction des macroagrégats qui représentent leur habitat physique dans le sol. Le labour représente donc une perturbation forte pour les champignons. Pour les bactéries, le fait qu'elles soient plus résistantes aux perturbations mécaniques (car plus petites et unicellulaires) et majoritairement localisées dans les microagrégats (qui restent intègres même après

Indice de Shannon

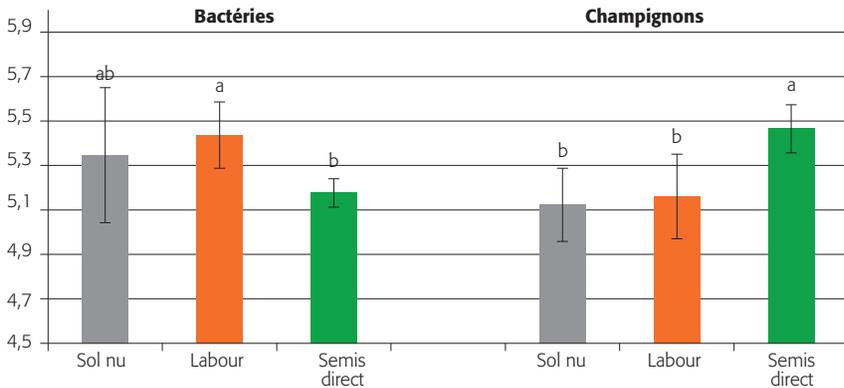


Figure 7 : Mesure de la diversité des communautés bactériennes et de champignons (Indice de Shannon) dans les sols (horizon 0-20 cm) soumis aux pratiques agricoles du site de Boigneville (sol nu, travail du sol et semi- direct).

un labour), permet d'émettre l'hypothèse que le labour représente, non pas une perturbation forte comme pour les champignons, mais une perturbation intermédiaire (ou moyenne). Selon le postulat écologique que la diversité d'une communauté est maximum pour une perturbation intermédiaire et minimum pour une perturbation forte (par sélection) ou faible (par exclusion compétitive) (Giller *et al.*, 1978), le labour représente donc une perturbation forte pour les champignons et intermédiaire pour les bactéries. A l'inverse et selon le même postulat, le semis direct représente une perturbation intermédiaire pour les champignons (synonyme de forte diversité) et faible pour les bactéries (synonyme de faible diversité).

2.2.4. Le travail du sol modifie la qualité de la composition des communautés microbiennes

Sur l'essai « environnement » de Boigneville, l'analyse des compositions microbiennes met en évidence la stimulation de certaines populations au détriment d'autres, sous la modalité travail du sol. Par exemple, le labour stimule des taxons bactériens de type Protéobactéries (genres *Massilia*, *Naxibacter*...), connues pour être résistantes aux environnements perturbés et de type copiotrophes stratèges r (favorisées par un environnement riche en matières organiques fraîches). Ces attributs écologiques indiquent qu'elles sont capables de se développer rapidement et de dégrader activement la matière organique fraîche facilement dégradable.

A l'inverse, le semis direct stimule des populations de types *Actinobacteria*, indicatrices d'environnements stables. Ces bactéries sont copiotrophes stratèges type k. Elles sont donc aussi fortement impliquées dans la dégradation de la matière organique mais de façon plus progressive que les stratèges r. Des bactéries du genre *Nitrospira* sont aussi préférentiellement stimulées par le semis direct. Ces bactéries sont connues pour être assez sensibles aux perturbations et surtout fortement impliquées dans le cycle de l'azote.

Pour les champignons, le labour entraîne une augmentation des *Basidiomycota* qui sont impliqués dans la dégradation de la matière récalcitrante alors que le semis direct favorise les champignons de type *Ascomycota* qui dégradent la matière organique fraîche peu récalcitrante.

L'analyse des compositions taxonomiques et des attributs écologiques et fonctionnels associés permet de conclure que le labour stimule des populations bactériennes opportunistes résistantes aux perturbations et qui vont consommer rapidement la matière organique fraîche apportée au sol (résidus ou amendements). Il en résulte que les champignons ont moins accès à ce type de matière organique d'où le développement de populations qui sont plus adaptées à dégrader de la matière organique récalcitrante comme la matière organique du sol (plus ou moins stabilisée). En semi-direct, la répartition entre les populations bactériennes et fongiques est plus équilibrée quant à leur capacité de dégradation de la matière organique fraîche, ce qui peut engendrer une fourniture en éléments minéraux à la plante, issue de la dégradation de la matière organique, plus progressive tout au long du cycle de développement de la culture.

2.3. Travail du sol couplé à des rotations

2.3.1. Le contexte expérimental

Des expérimentations *in situ* ont été menées dans les années 90 en France afin d'évaluer les effets des systèmes de cultures sur la faune du sol. Un essai a ainsi été mis en œuvre à Courseulles sur mer (Calvados) de 1989 à 1998 sur un sol limoneux profond à pH eau voisin de 7, afin de comparer les effets des pratiques agricoles en systèmes conventionnels par rapport à des systèmes « intégrés » (qu'on appellerait aujourd'hui raisonnés). Ces systèmes intégrés comportaient notamment, dans la plupart des cas, un travail du sol superficiel et moins d'intrants phytosanitaires et de fertilisants (Cortet *et al.*, 2002).

2.3.2. Un effet du travail du sol sur les microarthropodes variable selon la rotation culturale

Un des résultats majeurs observés sur ce site pour les communautés de microarthropodes concerne l'effet de la rotation. En effet, le type de culture mis en place à un moment donné induit de fait un certain nombre d'interventions culturales propres à cette culture mais qui peuvent être également modifiées par le précédent cultural, ce qui peut conduire à des états du sol différents sous une même culture en lien avec le précédent cultural. Ainsi, une parcelle cultivée en blé au moment de l'échantillonnage, dont le précédent cultural était du lin, avait été cultivée de façon très différenciée entre le système conventionnel et le système intégré, avec notamment un labour profond en conventionnel et un travail superficiel en intégré. Sur cette parcelle, la biodiversité des microarthropodes du sol (abondance, richesse) était supérieure en intégré par rapport au conventionnel. En revanche, une parcelle cultivée en blé au moment de l'échantillonnage, différenciée en terme de travail du sol de façon similaire à l'autre parcelle, mais dont le

précédent cultural était de la betterave, ne présentait pas les mêmes résultats. Les abondances étaient équivalentes en intégré et en conventionnel.

Ces résultats sont confirmés par ailleurs pour les microarthropodes du sol. Ainsi Dekkers *et al.* (1994), qui ont comparé différents systèmes de gestion des cultures, (conventionnel, intégré et biologique) concluent que les principaux facteurs permettant d'expliquer la répartition des microarthropodes sont le type de culture, son stade de développement, la date d'échantillonnage, le système de culture, ainsi que l'humidité du sol corrélée à la porosité. Dans le sud de la Suède, il a été rencontré des populations plus abondantes d'acariens et de collembolles dans des systèmes de culture comprenant une rotation blé/pois/orge/avoine ou colza/blé/avoine/orge/blé par rapport à des monocultures d'orge ou d'avoine (Andrén et Lagerlof, 1983). Jagers op Akkerhuis *et al.* (1988) ont montré que les populations de microarthropodes étaient différentes selon les types de cultures : les céréales sembleraient plus favorables aux microarthropodes que les betteraves sucrières, les pois ou le chanvre. Les cultures à tubercules, comme les pommes de terre ou les betteraves sucrières seraient particulièrement défavorables aux microarthropodes, car elles n'apporteraient pas une couverture végétale suffisante au sol, ne permettraient pas un apport permanent de matière organique fraîche et nécessiteraient un travail du sol plus profond.

2.4. Travail du sol associé à la rotation, le couvert et la réduction des intrants chimiques sur l'essai de la Cage

2.4.1. Le contexte expérimental

Le site expérimental de La Cage à Versailles (Yvelines) a été mis en place en 1998 pour évaluer les performances et les impacts de différents systèmes de culture dans le contexte d'agriculture du grand bassin parisien, caractérisé par des rotations courtes, une forte proportion de blé (un an sur deux) et une absence d'élevage, donc de fertilisants organiques. Le sol est un luvisol profond (classification FAO), développé sur des limons.

Cet essai compare trois systèmes de culture qui diffèrent principalement par le travail du sol, les rotations de culture et les apports de pesticides et de fertilisants (Pelosi *et al.*, 2009). Le système dit « intensif » est fondé sur la recherche du maximum de production par ha, ce qui nécessite l'utilisation de variétés très productives et un niveau élevé d'intrants fertilisants et phytosanitaires. Ces hauts niveaux de production sont censés garantir la rentabilité économique. Ce système est proche de la pratique actuelle dominante dans la région. Le système « biologique » satisfait le cahier des charges de l'agriculture biologique, qui interdit l'emploi d'intrants chimiques de synthèse. Dans le cas présent, l'absence de fertilisation organique oblige à introduire des légumineuses dans la succession pour assurer une fourniture d'azote aux autres cultures. Le système « Sous Couvert Végétal » (SCV) est basé sur la suppression du travail du sol et le maintien d'une plante de couverture, y compris pendant le cycle de la culture principale. Il est représentatif de l'agriculture de conservation.

L'essai est divisé en six parcelles d'un hectare, correspondant à deux réplicats de chacun des trois systèmes de culture. Chaque parcelle est elle-même divisée en deux sous-parcelles. Les rotations ont été instaurées de manière à ce que, chaque année, l'une des deux sous-parcelles soit en blé d'hiver.

2.4.2. *Le semis sous-couvert vivant : un système qui permet d'accroître significativement la biodiversité des sols*

Sur ce site, Henneron *et al.* (2014) se sont intéressés aux communautés de microorganismes, de nématodes et d'invertébrés de la macrofaune du sol, y compris les vers de terre, dans les trois systèmes de culture après 14 ans de différenciation de l'essai, au printemps 2011. Les communautés microbiennes ont été analysées grâce à des techniques de biologie moléculaire. La nématofaune et la macrofaune ont été analysées et classifiées en groupes fonctionnels.

Les abondances et les biomasses des organismes étudiés sont supérieures dans les systèmes SCV et biologiques par rapport au système intensif, excepté pour les nématodes prédateurs (Figure 8.b). L'abondance de la macrofaune est par exemple respectivement supérieure de 100 à 2 500 %, celle des nématodes de 100 à 700 % et celle des microorganismes de 30 à 70 % dans les deux systèmes «alternatifs», comparés au système « conventionnel ». La réponse est plus marquée pour la macrofaune et les nématodes que pour les microorganismes. Le système en agriculture de conservation (SCV) présente, de manière générale, des augmentations plus marquées que le système biologique. Les bactéries, les champignons, les vers de terre anéciques (créant un réseau de galeries verticales ou sub-verticales connectées à la surface) ainsi que les arthropodes phytophages et rhizophages sont par exemple plus nombreux en système SCV qu'en conventionnel (Figure 8.a). L'abondance de tous les types de nématodes est augmentée, excepté celle des carnivores. Les nématodes libres, bénéfiques pour le fonctionnement du sol, mais également les nématodes parasites des plantes cultivées, sont plus nombreux en SCV.

Ces travaux mettent en évidence un effet positif sur les organismes du sol des systèmes de culture alternatifs, et principalement de l'agriculture de conservation, par rapport au système intensif, actuellement le plus souvent pratiqué dans le bassin parisien. La modification des communautés d'organismes du sol pourrait avoir des conséquences sur le fonctionnement et les performances de l'agrosystème dans son ensemble.

3. Conclusion

L'étude des effets de pratiques culturales telles que le travail du sol sur les organismes vivants du sol est complexe compte tenu des nombreuses interactions et de la variabilité de ces effets dans l'espace et dans le temps. Ils doivent donc être étudiés jusqu'à des échelles assez fines (profil cultural) et sur des périodes de

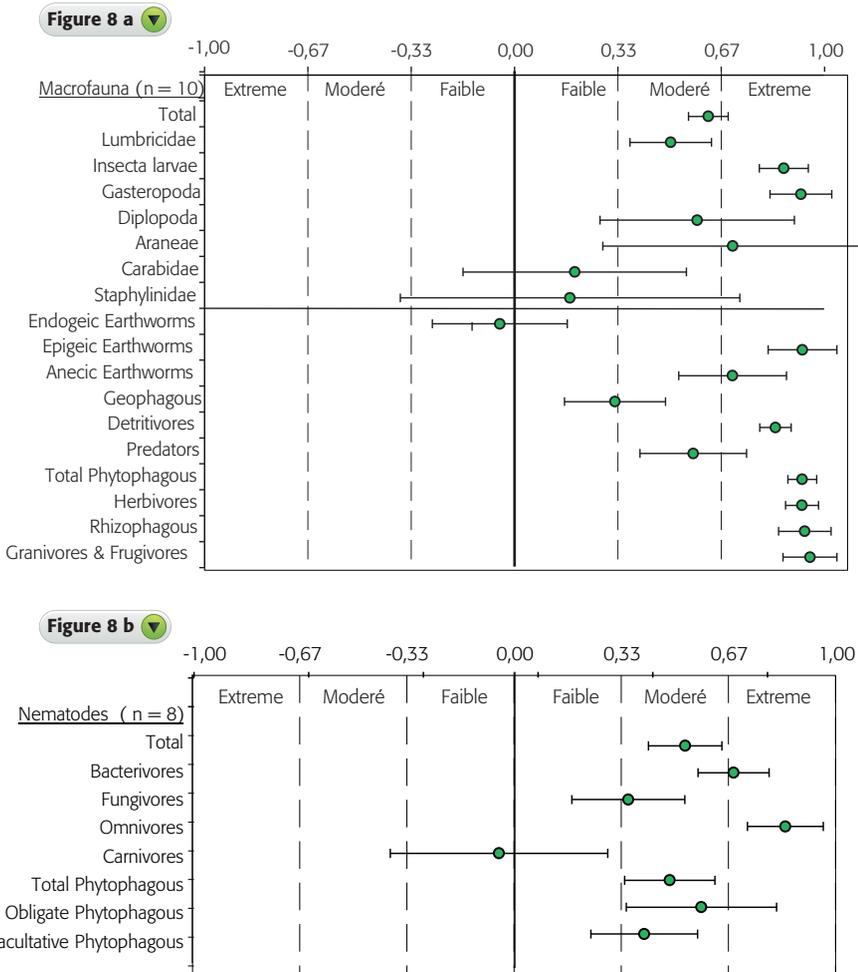


Figure 8 : Indice représentant le niveau de réponse du système SCV par rapport au conventionnel pour l'abondance de différents groupes taxonomiques et fonctionnels de la faune du sol sur l'essai de la Cage, a) macrofaune et b) nématofaune (moyenne \pm intervalle de confiance à 95 %) (d'après Henneron *et al.*, 2014)

temps suffisamment longues pour prendre en compte les capacités d'adaptation de certains organismes aux changements.

D'après les résultats exposés issus de plusieurs expérimentations réalisées sur le territoire national, pr, la réduction voire l'abandon du travail du sol a, le plus souvent, un effet positif sur l'abondance, l'activité et la diversité des organismes du sol, en lien avec une perturbation moindre de leurs habitats et de leurs ressources nutritives. Néanmoins les effets observés ne peuvent pas lui être exclusivement attribués car il a été le plus souvent étudié conjointement à d'autres pratiques culturales (rotations, mise en place de couverts végétaux, niveaux d'intensification, type de fertilisation) dans le cadre de comparaison de systèmes de culture dont il était une des composantes. Ainsi comme le montrent les résultats de l'essai

de La Cage, les systèmes d'agriculture de conservation qui combinent la mise en œuvre du semis direct, de rotations longues et d'une couverture végétale permanente, montrent les effets les plus marqués.

Cependant et contrairement à ce qui est véhiculé très souvent, les résultats des expérimentations montrent que le labour ne « tue » pas les sols et ses effets négatifs sont atténués s'il est couplé à des pratiques d'entretien organique du sol, de rotation des cultures, d'utilisation d'engrais verts, couverts végétaux et de réduction des produits phytosanitaires. A l'opposé les systèmes en agriculture de conservation demandent une maîtrise technique et des connaissances pratiques et écologiques poussées pour produire les effets attendus.

Si les conclusions, issues de ces différents sites permettent de mieux comprendre l'impact du travail du sol mais plus généralement des systèmes de culture sur le fonctionnement biologique des sols agricoles, d'autres travaux sont nécessaires pour augmenter la généralité de ces résultats tels que :

- mettre en place d'autres sites étudiant le travail du sol sous d'autres pédo-climats (Lienhard *et al.*, 2014) en lien avec différents systèmes de culture,
- étudier la grande diversité de types de travail du sol et identifier les plus adaptées au maintien du patrimoine biologique du sol,
- augmenter les échelles d'investigation et travailler dans des paysages agricoles et/ou via des réseaux d'exploitations agricoles,
- coupler les mesures de diversité à des mesures de fonctionnement biologique du sol (minéralisation de la matière organique du sol, infiltration de l'eau par exemple).

Par ailleurs, sur la base des résultats présentés, les indicateurs suivants pourraient être recommandés pour suivre la transition entre différents systèmes de culture ou les piloter : abondance et diversité des communautés lombriciennes, de nématodes et de micro-organismes (bactéries et champignons). Cette batterie minimale repose sur 3 outils pour lesquels des protocoles, des références et des laboratoires existent (<http://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/>). D'autres indicateurs informatifs tels que les microarthropodes ou la macrofaune totale (ex : carabes) pourraient également être ajoutés mais manquent encore de prestataires.

Les conséquences des modifications du fonctionnement biologique du sol sur les services écosystémiques rendus (structuration du sol, recyclage nutriments, transformation MO) ont été peu abordées hormis les effets de certains groupes écologiques de vers de terre sur le maintien de la structure et la création de porosité. Elles nécessitent d'évaluer simultanément les modifications des propriétés physiques et chimiques des sols, vues les fortes interactions entre ces 3 composantes afin de faire le lien entre la composante biologique (abondance, diversité, activité) et le fonctionnement des sols.

4. Références bibliographiques

- Andrade, D.S., Colozzi-Filho, A. et Giller, K.E. 2003. The Soil Microbial Community and Soil Tillage, p. 51-81, *In A. El Titi, ed. Soil Tillage in Agroecosystems. CRC Press LLC, Boca Raton.*
- Balesdent, J., Chenu, C. et Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53:215-230.
- Bouché M.B., 1972. Contribution à l'approche méthodologique de l'étude des biocénoses. *Ann. Zool. Ecol. Anim.*, 4 (4): 529-536.
- Bouché, M.B., Al-Addan, F. 1997. Earthworms, water infiltration and soil stability: some new assessments. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 441-452.
- Chabert, A., [sd]. Utilisation d'indicateurs biologiques pour l'analyse de l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement - (dossier 99/19 - Diagnostic environnemental et indicateurs biologiques). *Projet pilote conduit par l'ACTA. Montluel, 152p.*
- Chan, K.Y., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils. *Soil and Tillage Research* 57, 179-191.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent E., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A., Pérès G., 2012. Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology* 49, 63-72.
- Coleman DC., Crossley DA., Hendrix PF., 2004. Fundamentals of Soil Ecology 2nd edition. Academic Press. USA : *Elsevier Science & Technology Books, 2004, 408p. ISBN: 978-0-12-179726-3*
- Cookson, W.R., Murphy, D.V., et M.M. Roper. 2008. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 40:763-777.
- Dequiedt S., Saby N., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., and Ranjard L.. 2011. Biogeographical Patterns of Soil Molecular Microbial Biomass as Influenced by Soil Characteristics and Management. *Global Ecology and Biogeography*. 20: 641-652.
- Didden W.A.M., Marinissen J.C.Y., Vreeken-Buijs M.J., Burgers S.L., Geurs M., Brussaard L., Soil meso- and macro-fauna in two agricultural systems: factors affecting population dynamics and evaluation of their role in carbon and nitrogen dynamics, *Agric. Ecosyst. Environ.* 51, 171-186 (1994).
- Djigal D., Saj S., Rabary B., Blanchart E., Villenave C., 2012. Mulch type affects soil biological functioning and crop yield of conservation agriculture systems in a long-term experiment in Madagascar. *Soil and Tillage Research* 118, 11-21
- Drijber, R.A., Doran, J.W., Parkhurst, A.M., et D.J. Lyon. 2000. Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology & Biochemistry* 32.
- Ehlers W.M., 1975. Observation of earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.*, 119 (3): 242-249.
- Fujita M., Fujiyama S., 2001. Comparison of soil fauna (oribatids and enchytraeids) between conventional and organic (tillage and no-tillage practices) farming crop fields in Japan. *Pedosphere* 11, 11-20.

- Giller KE, Witter E, McGrath SP (1998) Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review. *Soil Biol Biochem* 30:1389–1414
- Glen D.M., Symondson W.O.C., 2003. Influence of soil tillage on slugs and their natural enemies. In: El Titi A. (ed.): *Soil tillage in agroecosystems*, CRC Press, Boca Raton, pp. 207–227.
- Govaerts B, Sayre K, Deckers J., 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Till Res* 87, 163–174.
- Grigera, M.S., Drijber, R.A., et B.J. Wienhold. 2007. Redistribution of crop residues during row cultivation creates a biologically enhanced environment for soil microorganisms. *Soil and Tillage Research* 94:550-554.
- Haygarth et Ritz, 2009. The future of soils and land use in the UK : soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy*. 26 : S187-S197
- Henneron L., Bernard L., Hedde M., Pélosi C., Villenave C., Chenu C., Bertrand M., Girardin C., Blanchart E. (2014) Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agronomy for sustainable development*. DOI 10.1007/s13593-014-0215-8
- Helgason B.L., Walley F.L., Germida J.J., 2009. Fungal and bacterial abundance in long-term no-till and intensive-till soils of the northern great plains. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 120–127.
- Holland J.M. & Luff M.L., 2000. The effects of agricultural practices on Carabidae in temperate agroecosystems. *Integrated Pest Management Reviews*, 5, 109-129
- Holland et Reynolds, 2003. The impact of soil cultivation on arthropod (Coleoptera and Araneae) emergence on arable land. *Pedobiologia*, Volume 47, Issue 2, pp. 181–191.
- Ibekwe, A.M., Kennedy, A.C., Frohne, P.S., Papiernik, S.K., Yang, C.-H., et D.E. Crowley. 2002. Microbial diversity along a transect of agronomic zones. *FEMS Microbiology Ecology* 39:183-191.
- Jeffery S., Gardi C., Jones A., Montanarella L., Marmo L., Miko L., Ritz K., Peres G., Römbke J. et Van Der Putten W. H. (eds.), 2010, Atlas européen de la biodiversité du sol. Commission européenne, Bureau des publications de l'Union européenne, Luxembourg. 130p. ISBN 978-92-79-29726-7
- Jouquet P., Podwojewski P., Bottinelli N., Mathieu J., Ricoy M., Orange D., et al . 2008. Above-ground earthworm casts affect water runoff and soil erosion in Northern Vietnam. *Catena*, 74, 13–21.
- Kladivko, E.J. 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil & Tillage Research* 61:61-76.
- Le Bayon R.C. & Binet F. 2001. Earthworm surface casts affect soil erosion by runoff water and phosphorus transfer in a temperate maize crop. *Pedobiologia*, 45, 430–442.
- Lee K.E., Foster R.C., 1991. Soil fauna and soil structure. *Austr. J. Soil Res.*, 29:745-775.
- Lowe C.N., Butt K.R., 2003. Influence of food particle size on inter- and intra-specific interactions of *Allolobophora chlorotica* (Savigny) and *Lumbricus terrestris*. *Pedobiologia* 47, 574-577.
- Maron, PA, Mougel C, Ranjard L*. 2011. Soil microbial diversity: spatial overview, driving factors and functional interest. *CRAS Biology II*. 334:403-411.
- Oorts, K. 2006. Effect of tillage system on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam soil in Northern France. *PhD thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris*.

- Peigné, J., Ball, B.C., Roger-Estrade, J. et C. David. 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management* 23:129-144.
- Peigné J., Cannavacciuolo M., Gautronneau Y., Aveline A., Cluzeau D., 2009. Earthworm populations under different tillage systems in organic farming. *Soil Till. Res.* 104, 207-214.
- Pekrun, C., Kaul, H.P., et W. Claupein. 2003. Soil tillage for sustainable nutrient management, p. 83-113, In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Miura F., Nakamoto T., Kaneda S., Okano S., Nakajima M., Murakami T., 2008. Dynamics of soil biota at different depths under two contrasting tillage practices. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 406-414.
- Parmelee R.W., Beare M.H., Cheng W., Hendrix P.F., Rider S.J., Crossley D.A., Coleman D.C., 1990. Earthworms and enchytraeids in conventional and no-tillage agroecosystems: a biocide approach to assess their role in organic matter breakdown. *Biology and Fertility of Soils* 10, 1-10.
- Pelosi C., Toutous L., Chiron F., Dubs F., Hedde M., Muratet A., Ponge J.-F., Salmon S., Makowski D., 2013. Reduction of pesticide use can increase earthworm populations in wheat crops in a European temperate region. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 181, 223-230.
- Pelosi C., Bertrand M., Roger-Estrade J., 2009. Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 287-295.
- Pèrès G., Cluzeau D., Curmi P., Hallaire V., 1998. Earthworm activity and soil structure changes due to organic enrichments in vineyard systems. *Biol. Fert. Soils* 27, 247-424.
- Pèrès G, Vandenbulcke F, Guernion M, Hedde M, Beguiristain T, Douay F, Houot S, Piron D, Rougé L, Bispo A, Grand C, Galsomies L, Cluzeau D (2011) The use of earthworms as tool for soil monitoring, characterization and risk assessment. Example of a Bioindicator Programme developed at National scale (France) *Pedobiologia* 54:77-87.
- Rovira A.D., Smettem K.R.J, Lee K.E., 1987. Effect of Rotation and Conservation Tillage on Earthworms in a Red-brown Earth under Wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 38: 829-834.
- Shipitalo, M.J. & Butt, K.R. 1999. Occupancy and geometrical properties of *Lumbricus terrestris* L. burrows affecting infiltration. *Pedobiologia*, 43, 782-794.
- Spedding, T.A., Hamel, C., Mehuys, G.R., et C.A. Madramootoo. 2004. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology & Biochemistry* 36:499-512.
- Tebrüge F., Düring R.A., 1999 – Reducing tillage intensity, a review of results from a long term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, 53: 15-28.
- Terra S., 2014. “Entre agroécologie et nouvelles technologies. *L'innovation en agronomie*. N° 435-436. 28 pages.
- Terrat S., Christen R., Dequiedt S., Lelievre M., Nowak V., Bachar D., Plassart P., Wincker P., Jolivet C., Bispo A., Lemanceau P., Maron P.A., Mougel C., and Ranjard L. *. 2012. Molecular biomass and MetaTaxogenomic assessment of soil microbial communities as influenced by soil DNA extraction procedure, *Microbial Biotechnology* 5:135-141.
- Van Capelle, C., Schrader, S., Brunotte, J., 2012. Tillage-induced changes in the functional 610 diversity of soil biota – A review with a focus on German data. *Eur. J. Soil Biol.* 50, 611 165-181.

- Van Vliet P.C.J., West L.T., Hendrix P.F., Coleman D.C., The influence of *Enchytraeidae* (*Oligochaeta*) on the soil porosity of small microcosms, *Geoderma* 56, 287-299 (1993).
- VanVliet P.C.J., Coleman, D.C., Hendrix, P.F., 1997. Population dynamics of Enchytraeidae (*Oligochaeta*) in different agricultural systems. *Biology and Fertility of Soils* 25, 123-129.
- Vian, 2009. Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique : effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote. *PhD thesis, ISARA-Lyon, AgroParisTech, 171p.*
- Vian, J.F et Peigné, J., 2012. Influence du travail du sol sur différents bioindicateurs du sol. Résultats des mesures des Bioindicateurs sur le site de Thil. *Programme Bioindicateurs de la qualité des sols, phase II – ADEME. 78p.*
- Villeneuve C., Ba A.O., Rabary B., 2009. Analyse du fonctionnement biologique du sol par l'étude de la nématofaune: semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabé (Madagascar). *Etude et gestion des sols* 16, 369-378.
- Wright, A.L., Hons, F.M., et J. Matocha, John E. 2005. Tillage impacts on microbial biomass and soil carbon and nitrogen dynamics of corn and cotton rotations. *Applied Soil Ecology* 29:85-92.
- Young, I.M., et K. Ritz. 2000. Tillage, habitat space and function of soil microbes. *Soil and Tillage Research* 53:201-213.