

MISE EN OEUVRE DE L'OUTIL AGRO-ECO SOL : évaluation de la pertinence des bioindicateurs et des liens avec les pratiques agricoles ? sur un jeu de données test

Carton-Moreau Cyriaque¹, Le Souder Christine², Hourcade Delphine³, Valé Matthieu⁴

¹AUREA AGROSCIENCES, 34 route de Saint Roch, 37390 La Membrolle sur Choisille, France ; ²Arvalis, Station expérimentale, 91720 Boigneville, France ; ³Arvalis, Station inter-instituts, 6 chemin de la côte vieille, 31450 Baziège, France ; ⁴AUREA AGROSCIENCES, 270 avenue de la pomme de pin, 45160 Ardon, France

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, des outils d'aide à la décision voient le jour pour accompagner les acteurs du monde agricole dans les prises de décision liées à leurs pratiques. L'idée de produire plus et mieux est prépondérante dans les besoins actuels. Les sols sont des facteurs majeurs de la production agricole. Ils remplissent des fonctions de support et de nutrition des plantes. Ils servent également de réservoir de carbone.

Le projet Agro-Eco sol est né d'une volonté de pouvoir accéder à une gestion agroécologique des sols incluant l'ensemble des pratiques agricoles et à des outils d'évaluation et de conseil fiables, pratiques et reproductibles. Conduit de juillet 2017 à mars 2023, il est porté par Auréa AgroSciences, en partenariat avec l'INRAE et ARVALIS. Grâce à du transfert de technologie entre la recherche et Auréa, la mise en œuvre de ruptures technologiques sur les différentes étapes du processus analytique (prélèvement, préparation, mesure) et l'acquisition de nouvelles références, un large panel d'indicateurs est opérationnel pour réaliser le diagnostic fonctionnel ([Le Souder et al. 2021](#)). Basé sur la confrontation entre des niveaux attendus et mesurés de fonctions agronomiques, environnementales et écologiques du sol, ce diagnostic débouche sur des propositions de leviers agronomiques pour entretenir ou améliorer les services rendus par le sol ([Le Souder et al. 2021](#)). La définition des niveaux attendus, ainsi que des relations entre indicateurs et processus du sol repose sur la littérature scientifique, la mise en œuvre de modèles, mais également de dires d'experts.

À la suite de ce projet de recherche et développement de 6 ans, l'outil d'analyse, de diagnostic et de conseil Agro-Eco Sol a été déployé sur le terrain. Cet outil regroupe environ 190 variables : observations terrain, indicateurs physico-chimiques et indicateurs biologiques. Un total de 34 référentiels sont utilisés pour l'analyse et l'interprétation de ces indicateurs. Cet outil Agro-Eco Sol a été testé et utilisé sur un total supérieur à 200 parcelles agricoles, ceci représentant un total approximatif de 10 000 analyses réalisées.

Cette base de données exceptionnellement complète nous permet de valider nos méthodes face aux référentiels historiques et issus de la recherche. Les indicateurs Agro-Eco Sol fonctionnent ensemble, en interaction dans le compartiment sol pour remplir les fonctions du sol. Cette base de données permet de tester les interactions entre ces indicateurs, identifier des corrélations, de possibles redondances. Si des interactions sont observées, sont-elles attendues ou aberrantes ? De plus, grâce aux essais longue durée multipartenaires pour lesquels nous connaissons l'historique des pratiques, nous allons pouvoir mettre en évidence la réponse des indicateurs à différentes pratiques.



MATERIEL et METHODE

1. Les indicateurs

L'outil Agro-Eco Sol regroupe un large panel d'indicateurs. Une partie physico-chimique classique regroupant des indicateurs tels que la texture, le pH, la teneur en carbone et en matière organique, en azote, en éléments nutritifs. Ces indicateurs plus classiques sont complétés par des indicateurs biologiques regroupant, les fractions labiles et stables du carbone et de l'azote, les abondances, activités et diversités des bactéries et champignons du sol, des indicateurs de mésofaune (carabes, vers de terre, nématodes, collemboles) (Tab.1).

2. Les référentiels et modèles prédictifs

L'outil Agro-Eco Sol est basé sur différents référentiels qui proviennent à la fois de données internes et de référentiels issus de la recherche. Un total de 34 référentiels sont utilisés et testés pour Agro-Eco Sol ; ils servent essentiellement au positionnement relatif des valeurs mesurées, certains servant aussi au moteur d'interprétation fonctionnel. Les référentiels liés aux indicateurs environnementaux sont issus des données historiques d'Auréa Agrosociences. Les référentiels des indicateurs d'abondance, de diversité et d'activité des microorganismes du sol viennent du réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) et de données transmises par l'INRAE dans le cadre des échanges de compétence lors de la création de l'outil. Les référentiels de la faune du sol sont issus de bases de données de l'INRAE pour les vers de terre, de différents projets d'études pour les carabes, de données publiées pour les collemboles (Joimel et al. 2017). Les référentiels des nématodes ont été produits par ELISOL (Tab.1).

Tableau 1: Liste des indicateurs biologiques et de leur référentiel présent dans l'outil Agro-Eco Sol

Type d'indicateur	Méthode	Référentiels utilisés
Caractérisation de la matière organique : Carbone et azote labiles/stables	•Fractionnement granulométrique de la matière organique •Carbone microbien par fumigation	BDD Auréa
	•Carbone oxydable KMnO4 •Azote Biologiquement Minéralisable	Microbioterre + BDD Auréa
Abondance microbienne	•ADN microbien total (BMM) •Abondance relative des champignons (ADNr 18S) et des bactéries (ADNr 16S) (ratio F/B)	RMQS 1 ^{ère} campagne
Activité microbienne	Activités enzymatiques (N, C, P, S)	BDD INRAE + RMQS
Diversité des bactéries et champignons	Diversité taxonomique par séquençage ADN haut débit	RMQS 1 ^{ère} campagne
Abondance et diversité des vers de terre, carabidés et collemboles	Identification par analyse morphologique	Vers de terre : INRAE (M. Hedde) + M Bouché Carabidés : SOERE ACBB, projet ARENA et ARVALIS Collemboles : Joimel et al. 2017
Abondance et diversité des nématodes	Identification par analyse morphologique	BDD ELISOL (Elipto®)

3. Les prélèvements

L'outil Agro-Eco Sol est mis en place sur le terrain par une équipe de préleveurs formés sur les différents protocoles spécifiques liés aux indicateurs mesurés. Les prélèvements demandent un certain nombre de prérequis quant à l'état de la parcelle. Celle-ci ne doit être ni trop sèche ni trop humide, l'idéal est un sol frais et ressuyé. Les prélèvements doivent être faits soit avant, soit 3 semaines après tout apport d'engrais minéral. Ils doivent également être faits avant ou deux à trois mois après tout travail du sol et apport d'amendement organique. Une fois ces prérequis validés, alors les prélèvements peuvent commencer. La première étape est le prélèvement des collemboles par carottage des premiers centimètres de sol à l'aide d'un cylindre en inox. La seconde étape consiste à creuser un trou de 25*25*25 cm pour une extraction manuelle des vers de terre, ce protocole est adapté du protocole de l'OPVT et simplifié à 3 répétitions. A la suite du prélèvement des vers de terre un test bêche est réalisé sur le bord de trou formé à une profondeur de 25 cm. Ce test bêche suit la méthode ISARA (Josephine Peigné et al. 2016). Le test bêche nous permet d'observer et d'évaluer la structure du sol et son niveau de compaction. Après avoir réalisé le test bêche et l'extraction des vers de terre, la terre est retournée au champ. Un piège est ensuite placé dans la terre ameublie et laissé en place pour prélever les carabes. La dernière étape du prélèvement consiste en un prélèvement de terre. 20 carottes de terre sont prélevées sur 20 cm de profondeur. La terre est ensuite mélangée, homogénéisée et répartie dans les différents consommables liés aux analyses, physico-chimique sur sol sec, biologique sur sol brut (Nématodes, Fractions labiles d'azote et de carbone, Abondance et diversité des microorganismes).

4. Les jeux de données tests

Pour tester les résultats de l'outil Agro-Eco Sol, deux bases de données ont été utilisées, une base de données regroupant l'ensemble des parcelles prélevées et une base de données regroupant seulement des parcelles d'essais de longue durée.

a. Base de données complète

La base de données complète des analyses Agro-Eco Sol regroupe 200 échantillons prélevés entre le printemps 2021 et le printemps 2023. Ces échantillons font à la fois partie des prélèvements test du projet et des prélèvements réalisés à la suite de la mise en production de l'outil. Ces prélèvements ont été réalisés sur l'ensemble du territoire français métropolitain. Pour les 200 échantillons de la base, tout ou partie des analyses ont été réalisées en fonction des demandes et besoins des clients. De plus, nous ne connaissons pas forcément le détail des pratiques utilisées. C'est pourquoi nous avons extrait de cette base complète des échantillons issus d'essais de longue durée.

b. Essais de longue durée

64 échantillons sont issus de prélèvements dans 8 sites d'essais de longue durée, d'Arvalis ou de partenaires d'Arvalis. Ces sites sont répartis sur la France métropolitaine et concernent différentes pratiques agricoles (Fig.1). Ces 8 sites présentent un panel de caractéristiques du sol assez large. Les sols sont majoritairement limoneux (5/8). Seuls les sites de Poix, Pusignan et Syppre Béarn diffèrent avec respectivement : un sol de craie, un sol de gravier profond et une terre noire humifère de type touyas. Ce dernier site présente une teneur en matière organique plus élevée que les autres sites, ainsi qu'un pH plus acide. Les autres sites d'essais sont quant à eux dans la moyenne haute des sites agricoles pour ces deux paramètres (BDD interne AUREA). Globalement, les sites ne présentent pas de valeurs extrêmes, hormis le site de Poix avec une teneur en calcaire entre 54 et 86 % (Tab.2). Ils offrent malgré tout une bonne représentativité des situations agro-environnementales rencontrées sur le territoire métropolitain. De plus, pour ces 64 échantillons, nous connaissons l'ensemble des informations agronomiques avec un historique sur une période de 5 ans (2 ans avant prélèvement et 2 ans après prélèvement). Ces informations nous ont été transmises par Arvalis.



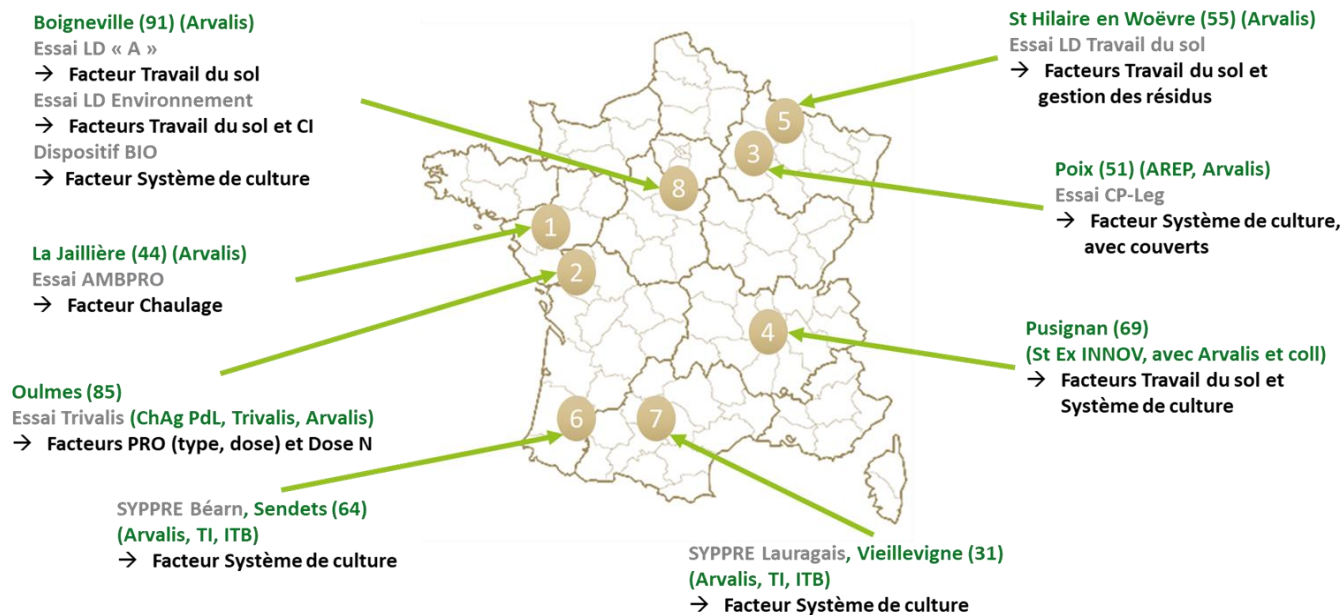


Figure 1 : Carte des sites d'essais longue durée prélevés et analysés par l'outil agro-éco sol

5. Analyses des données

L'ensemble des analyses de données a été réalisé sous Rstudio. Trois types d'analyses ont été conduites. Pour savoir si nos observations sont dans les référentiels, nous nous sommes concentrés sur les résultats des essais longue durée. Les distributions des 64 mesures réalisées pour les 33 variables dont nous avons un référentiel ont été comparées à la distribution des valeurs de ces référentiels. Pour ce faire, des courbes de distribution ont été tracées grâce au package « ggplot2 ». Les courbes des mesures et des référentiels pour un même indicateur ont été dessinées sur un même graphique. Les référentiels comptant plusieurs centaines de valeurs et nos mesures seulement 64, nous n'avons pas prêté attention à la fréquence des mesures représentées en ordonnée, mais nous nous sommes concentrés sur l'axe des abscisses représentant la distribution des valeurs. L'idée de cette représentation est d'apprécier visuellement la distribution de nos mesures dans le référentiel et d'identifier de potentielles valeurs aberrantes.

La seconde question était axée sur l'analyse des relations entre indicateurs et l'identification de redondances entre indicateurs. Dans le cas de cette question, nous avons utilisé l'ensemble des 200 parcelles prélevées. La réponse à cette question s'est faite en deux temps. Tout d'abord, nous avons fait tourner des corrélations par groupe d'indicateurs, en commençant par les indicateurs physico-chimiques pour valider nos mesures. Ensuite, les corrélations ont été faites par groupe d'indicateurs biologiques. Nous avons également étudié les relations entre différentes mesures d'un même indicateur ; c'est le cas pour l'abondance des microorganismes qui est mesurée selon deux méthodes d'analyse, une méthode historique par fumigation (NF ISO 14240-2 (1997)) et une méthode plus moderne par biomasse moléculaire (BMM) (NF ISO 11063 (2011)), modifiée par Terrat et al. (2015). La biomasse moléculaire microbienne est souvent mise de pair avec le rapport abondance fongique sur abondance microbienne (rapport F/B). Nous avons donc testé la relation entre les deux.

Dans un second temps, nous avons regardé les corrélations entre les indicateurs biologiques et les facteurs explicatifs fournis par les modèles prédictifs issus de la recherche. Les modèles prédictifs pour les activités enzymatiques et les indicateurs microbiens font intervenir comme facteurs environnementaux explicatifs, le pH, la matière organique, le carbone organique. Pour ces corrélations, nous avons utilisé la fonction source « panelutils.R » (Borcard, Gillet, et Legendre 2011) afin d'avoir une vision d'ensemble des corrélations. Les corrélations de Pearson ont été analysées en utilisant la fonction « cor.test », que nous avons représentée graphiquement grâce au package « ggplot2 ».

Le dernier point de ce travail est de regarder l'impact des pratiques agricoles sur les indicateurs mesurés par l'outil Agro-Eco Sol. Pour regarder ces impacts, nous avons de nouveau fait un focus sur les essais longue durée pour lesquels Arvalis nous avait fourni les informations quant aux pratiques utilisées. Deux pratiques ont été retenues car identifiées comme fortement impactantes pour les bioindicateurs du sol, le travail du sol (Bouthier et al. 2014; Schlüter et al. 2018) et l'introduction de cultures intermédiaires. Huit paires de modalités, issues de 3 essais longue durée, testant le travail du sol ont été sélectionnées pour tester l'impact du labour comparé au non-labour (semis direct ou *striptill*). Pour l'effet de l'introduction des cultures intermédiaires, nous avons utilisé 5 paires de modalités issues de 5 sites d'essais. Nous parlons de paires de modalités pour signifier que pour un même essai, soit dans des conditions identiques, nous avons une modalité « positif » (avec culture intermédiaire ou labour) et une modalité « négatif » (sans culture intermédiaire ou labour). Ces paires de modalités ont été comparées à l'aide de tests de Student pour déterminer s'il y a une différence significative entre les modalités positives et négatives. Par la suite, ces relations ont été représentées graphiquement en *boxplot*.

Tableau 2: Caractéristiques agro-environnementales des 8 sites d'essais longue durée

Site	Sol	MO%	pH	Argiles %	CaCO3 %
1– La Jaillière	Limon battant drainé de l'ouest	2,4 – 2,9	6,9 – 7,8	17 – 22	0,1 – 0,9
2– Oulmes	Limon battant profond (90 cm) sain en profondeur	2,4 – 2,8	6,6 – 7,4	19 – 23	0,1
3– Poix	Craie	2,6 – 4,3	8,1 – 8,2	5 – 7	53,5 – 86,4
4– Pusignan	Gravier profond	1,9 – 2,8	6,4 – 7,7	13 – 16	0,1 – 1,3
5– St-Hilaire-en-Woëvre	Limon hydromorphe	1,5 – 2,3	7,0 – 8,1	18 – 22	0,1 – 2,1
6– Syppre Béarn	Terre noire humifère	4,3 – 5,2	5,3 – 6,3	19 – 24	0,1
7– Syppre Lauragais	Argilo-calcaire de coteaux	1,7 – 1,9	8,1 – 8,2	25 – 24	1,0 – 2,0
8– Boigneville	Limon argileux sur calcaire	1,4 – 4,9	5,8 – 8,2	15 – 29	0,1 – 20,2

RÉSULTATS et DISCUSSION

L'outil Agro-Eco Sol, faisant suite au projet de recherche et développement (Le Souder et al. 2021), est un outil fonctionnel comme nous le montre le nombre de prélèvements et d'analyses réalisés. Trois problématiques sont traitées dans cet article : Est-ce que les valeurs mesurées sont cohérentes à leurs référentiels ? Quelles sont les interactions entre les variables Agro-Eco Sol, sont-elles attendues, aberrantes ? Comment les pratiques agricoles impactent les indicateurs Agro-Eco Sol ?

Comparaison aux référentiels

Sur les 34 variables analysées aucune valeur aberrante n'a été observée. Les distributions des mesures se trouvent à chaque fois dans les référentiels et les pics de fréquences se superposent.



Cependant, de légers décalages de distribution peuvent être observés comme pour le carbone oxydable au permanganate de potassium ($C.KMnO_4$). La distribution des valeurs brutes en milligramme de carbone oxydable par gramme de sol tend à se décaler vers des valeurs plus élevées (Fig.2a). L'une des explications de ce décalage peut venir d'un taux de matière organique relativement plus élevé dans les sols des échantillons mesurés que dans les sols du référentiel. Pour s'affranchir de la teneur en matière organique, les valeurs brutes sont rapportées au taux de carbone organique du sol. Dans ce cas, les courbes sont statistiquement similaires d'après le test de variance des médianes Wilcoxon-Mann-Whitney (p -value=0.152). Cependant, le même décalage est observé bien que moins prononcé (Fig.2b). Cette différence peut trouver de multiples explications. Il a été montré que le carbone oxydable au permanganate de potassium est sensible aux pratiques agricoles (Culman et al. 2012). Les pratiques culturales telles que la restitution des résidus, l'apport d'amendements organiques, la diversification de la rotation tendent à augmenter les stocks de carbone (Gattinger et al. 2012).

Les mesures des activités enzymatiques présentent les plus belles superpositions avec leurs référentiels. Aucune valeur aberrante n'est observée et certaines activités comme celle de l'Arylamidase présentent des courbes statistiquement identiques au référentiel (Kolmogorov-Smirnov ; $D=0.44$, p -value<0.001) (Fig.3).

La biomasse microbienne moléculaire, un indicateur de la vie microbienne des sols, présente des valeurs cohérentes au référentiel bien qu'un second pic se dessine pour les valeurs entre 80 et 100 microgrammes d'ADN par gramme de sol. Ce pic secondaire reste dans la distribution du référentiel, mais se distingue fortement par sa fréquence (Fig.4). Bien que nous ayons dit précédemment que la fréquence des mesures ne devait pas être prise en compte, ce pic a attiré notre attention. Après l'étude de la base de données, nous avons remarqué que ces valeurs viennent du site d'essai longue durée de Poix. Ce site présente un sol de craie et donc de fortes teneurs en calcaire, entre 53,5 et 86,4%. Il est communément admis en agronomie que l'augmentation du taux de calcaire dans le sol diminue l'activité microbienne (Clivot et al. 2017). On s'attend donc à avoir une activité microbienne plus faible et par extrapolation une abondance microbienne plus basse sur le site de Poix. Il est important de rappeler dans ces conditions que l'activité des microorganismes du sol, qui intéresse les agronomes, est due à une petite partie de la diversité microbienne du sol. En utilisant un indicateur généraliste de l'abondance microbienne qu'est la biomasse microbienne moléculaire, il n'est pas si surprenant d'avoir une augmentation de l'abondance des microorganismes sans impact sur l'activité. De plus le site de Poix présente une teneur en matière organique relativement plus élevée favorisant le développement des microorganismes.

Dans le cas des bioindicateurs de la faune du sol, nous trouvons de nouveau une superposition satisfaisante des courbes. C'est le cas pour l'abondance moyenne de carabes par piège (test : Wilcoxon-Mann-Whitney ; p -value=0.740) (Fig.5).

La majeure partie des analyses d'indicateurs faites dans l'outil Agro-Eco Sol sont réalisées en interne chez AUREA. Pour des indicateurs comme la biomasse microbienne moléculaire ou les bioindicateurs de la faune du sol, des transferts de technologie de la recherche vers Auréa ont été réalisés durant le projet Agro-Eco Sol. La validation des 34 variables via leur référentiel nous permet de valider ce transfert de technologie et les capacités d'analyses d'Auréa.

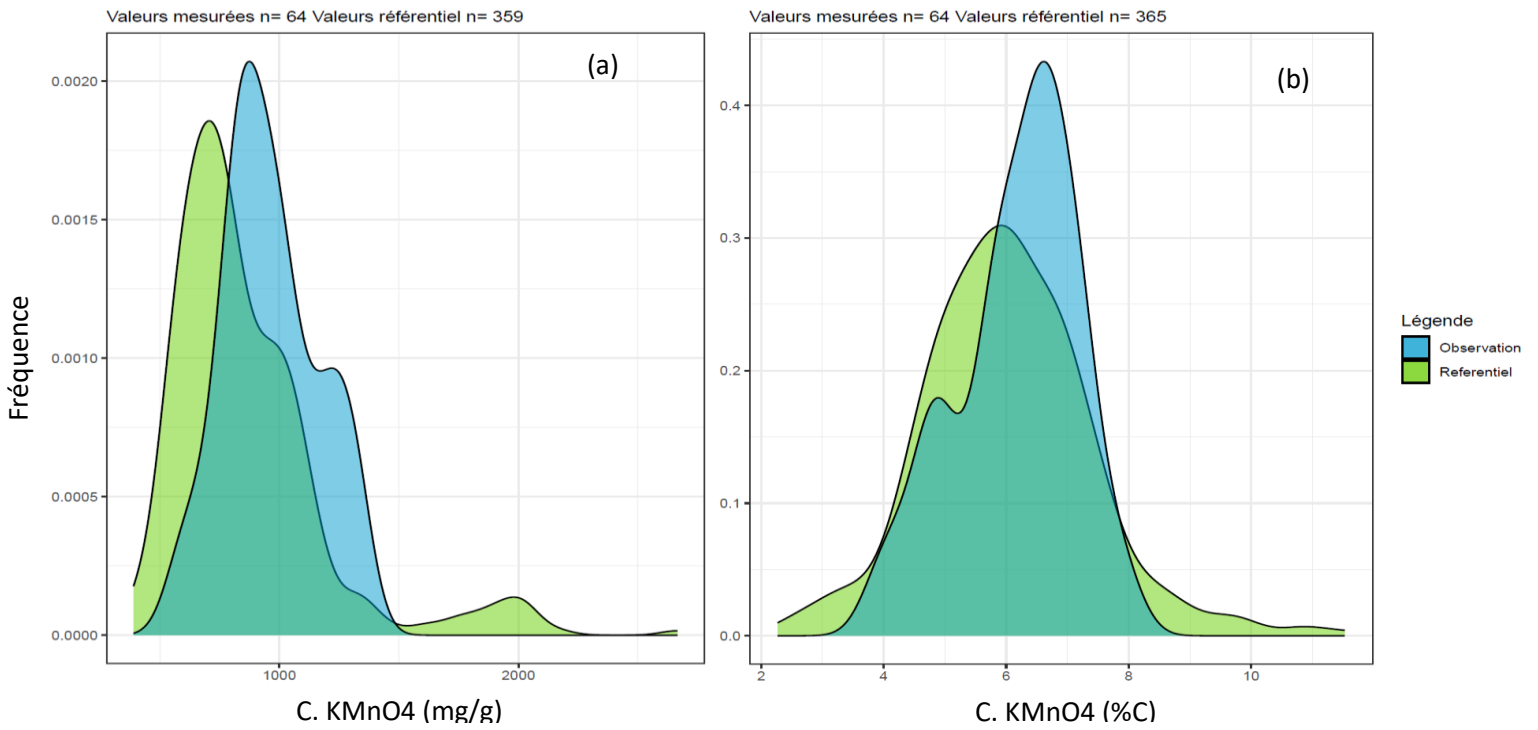


Figure 2 : Courbes des distributions des valeurs des carbone oxydable au permanganate de potassium (C. KMnO4) (courbes bleues) et de leurs référentiels (courbes vertes). (a) Carbone oxydable au permanganate de potassium en milligramme par gramme de sol. (b) Carbone oxydable au permanganate de potassium rapporté à la teneur en carbone du sol (%).

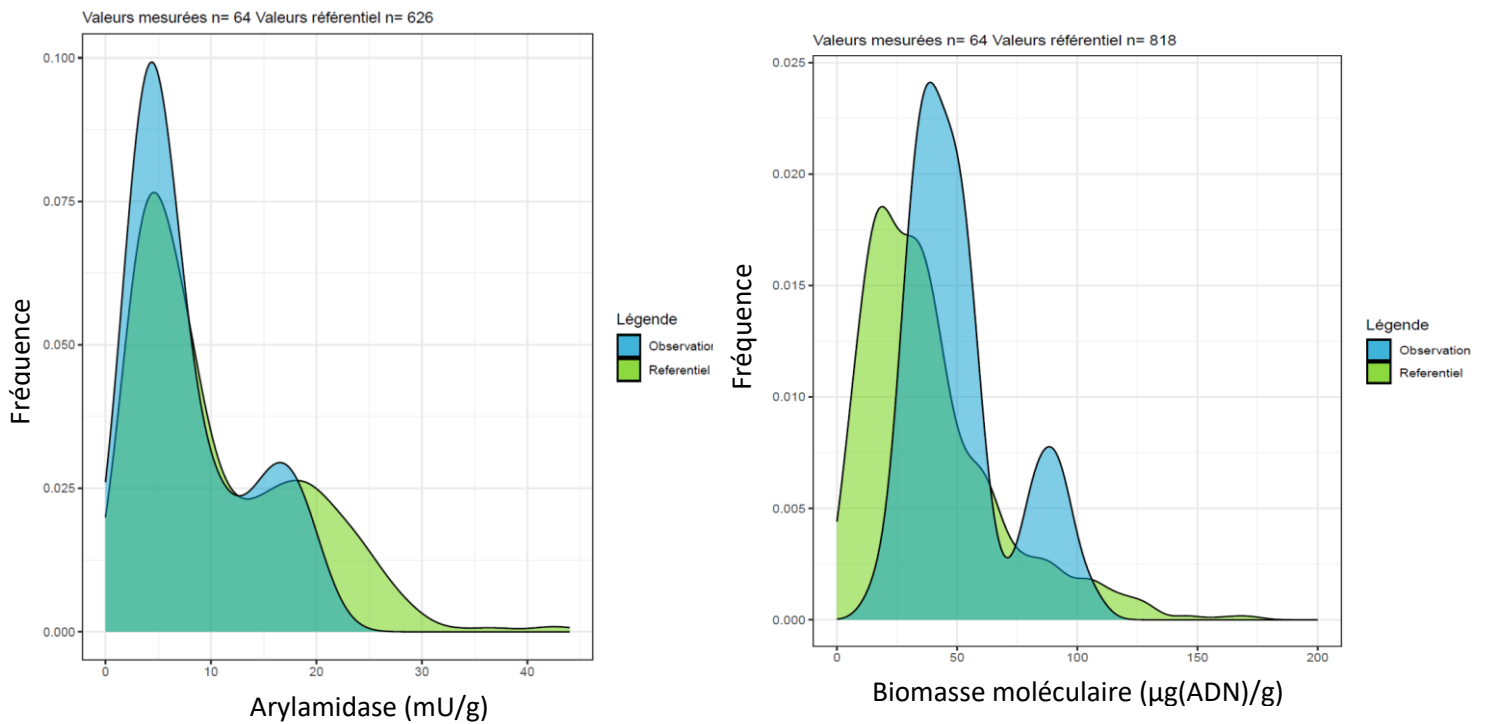


Figure 3 : Courbes de distributions de l'activité de l'enzyme Arylamidase en milli-unité universel par gramme de sol (bleue) et de son référentiel (verte).

Figure 4 : Courbes de distributions de la biomasse microbienne moléculaire en microgramme d'ADN par gramme de sol (bleue) et de son référentiel (verte).

Interaction entre variables

Le second objectif de ce travail est d'identifier et de caractériser les relations entre les variables d'Agro-Eco Sol. Est-ce que certains indicateurs sont redondants ? Est-ce que les relations observées entre indicateurs sont attendues ou aberrantes ?

Sur l'ensemble des corrélations étudiées pour les 200 parcelles Agro-Eco Sol, très peu de redondances sont observées. Sur les 8 enzymes de l'outil, 3 sont fortement et positivement corrélées entre elles : La phosphodiesterase et la phosphatase alcaline ($P = 0.86$; $p\text{-value} < 0.001$), la phosphodiesterase et la β -glucosidase ($P = 0.79$; $p\text{-value} < 0.001$), la phosphatase alcaline et la β -glucosidase ($P = 0.84$; $p\text{-value} < 0.001$). De plus, cette dernière enzyme est fortement et positivement corrélée à la β -galactosidase ($P = 0.82$; $p\text{-value} < 0.001$) (Fig.6). Les activités enzymatiques de la β -glucosidase, de la phosphatase alcaline et de la phosphodiesterase peuvent être caractérisées comme redondantes. En effet, sur trois activités liées au cycle du phosphore, deux d'entre elles sont fortement, positivement corrélées à l'activité de la β -glucosidase. Ceci laisse supposer que la β -glucosidase pourrait être représentative des activités des deux phosphatases et les substituer.

Le carbone microbien par fumigation et la biomasse microbienne moléculaire (BMM) sont deux méthodes servant toutes deux à caractériser l'abondance microbienne du sol. L'utilisation de ces deux méthodes, conjointement, peut paraître redondante. Bien que ces deux méthodes soient positivement corrélées ($P=0.63$; $p\text{-value} < 0.001$), une grande dispersion des mesures est observée (Fig.7). Cette grande dispersion des valeurs autour de la courbe nous laisse penser que ces deux méthodes ne sont pas substituables, car elle présente des sensibilités différentes aux facteurs agro-environnementaux.

La biomasse microbienne moléculaire est souvent, et historiquement, mise de pair avec le rapport champignon sur bactérie (F/B) (Sakamoto et Oba 1994; Landesman et Dighton 2011). Nous avons donc testé la relation entre ces deux indicateurs. La biomasse moléculaire microbienne présente une corrélation négative modérée avec le rapport F/B ($P = -0.22$; $p\text{-value} = 0.0015$). La forte dispersion des valeurs ne nous permet que d'observer une tendance : une proportion de champignons plus importante (rapport F/B plus élevé) dans les situations avec une biomasse moléculaire plus faible.

Les indicateurs d'abondance et d'activité microbienne sont utilisés dans l'outil Agro-Eco Sol face à des modèles prédictifs (Horrigue et al. 2016; Dequiedt et al. 2020). Ces modèles prédictifs font intervenir des paramètres environnementaux comme la teneur en carbone organique du sol ou le pH. Nous avons donc testé les relations de ces facteurs explicatifs sur les indicateurs biologiques. Le taux de carbone organique du sol est positivement corrélé aux activités enzymatiques de la β -glucosidase ($P = 0.52$; $p\text{-value} < 0.001$) et à celle de la phosphatase alcaline ($P = 0.6$; $p\text{-value} < 0.001$).

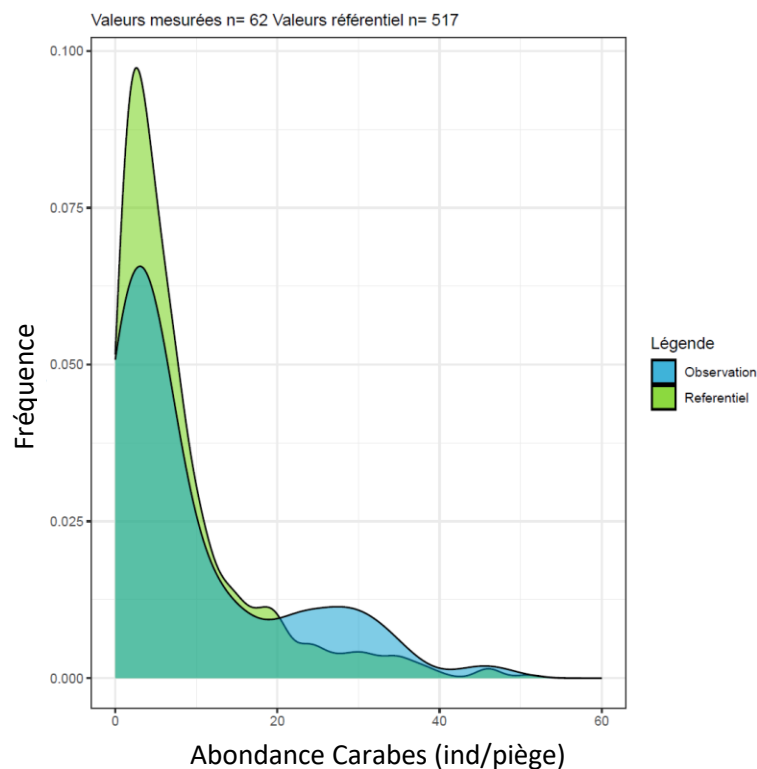


Figure 5: Courbes de distributions de l'abondance moyenne de carabes par piège (bleue) et de son référentiel (verte).

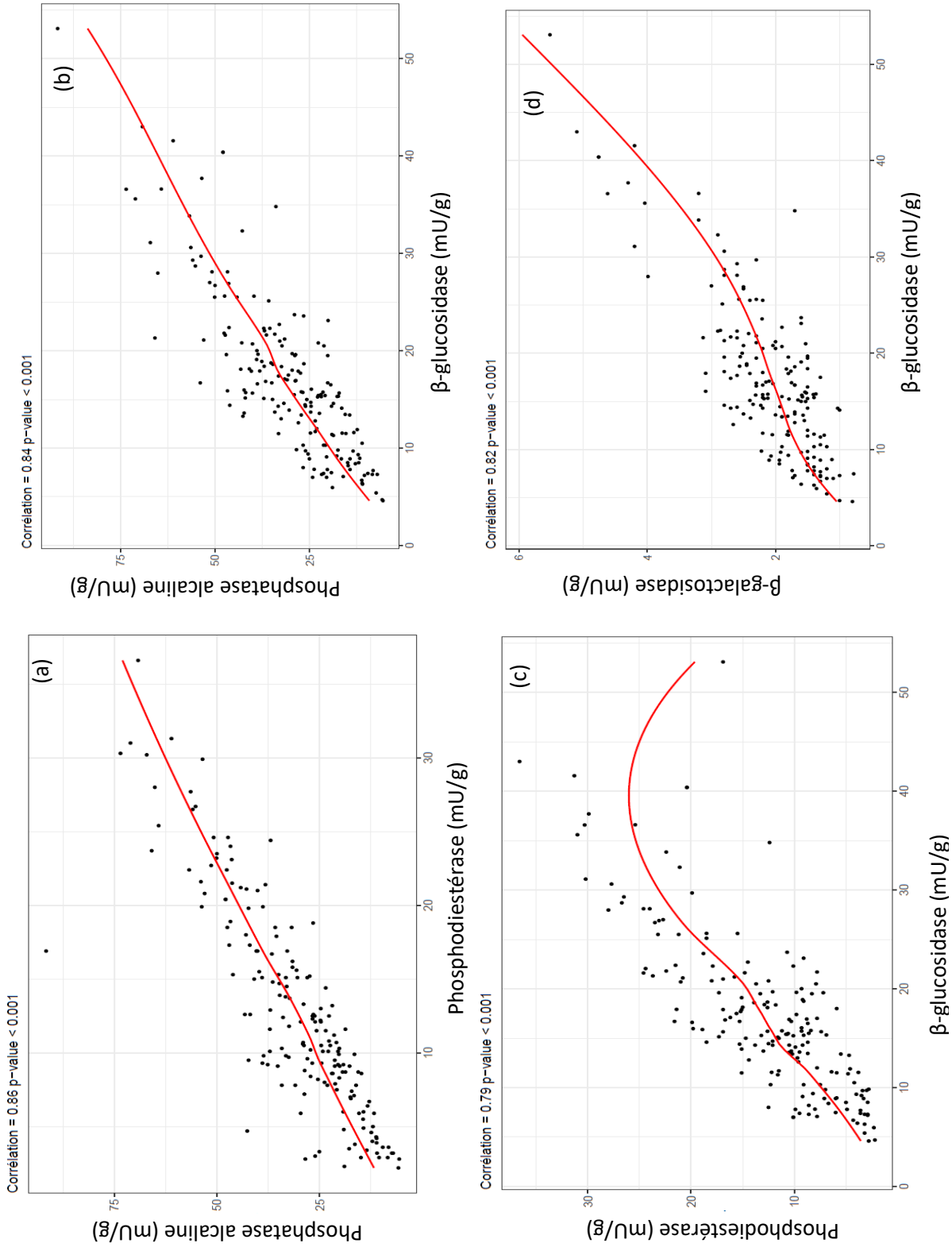


Figure 6: Corrélation entre activités enzymatique. (a) Corrélation entre les activités des enzymes Phosphodiesterase et Phosphatase alcaline. (b) Corrélation entre les activités des enzymes Phosphatase alcaline et β -glucosidase. (c) Corrélation entre les activités des enzymes Phosphodiesterase et β -glucosidase. (d) Corrélation entre les activités des enzymes β -galactosidase et β -glucosidase.

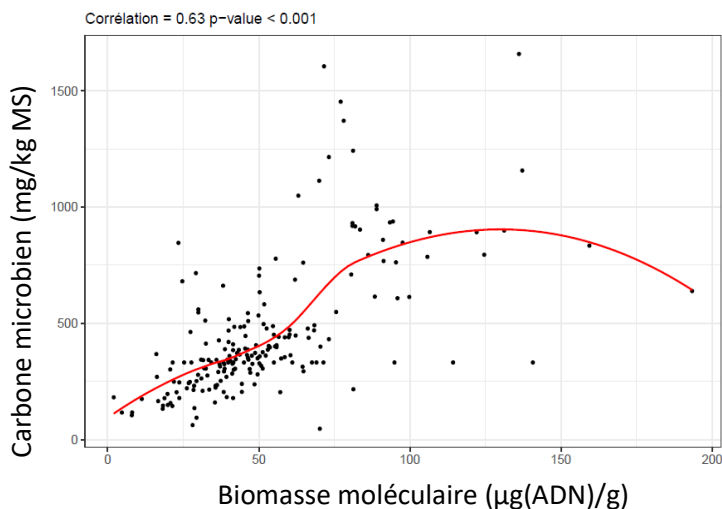


Figure 7: Corrélation entre les mesures de carbone microbien par fumigation et les mesures de biomasse microbienne moléculaire, deux méthodes de mesure d'abondance microbienne du sol

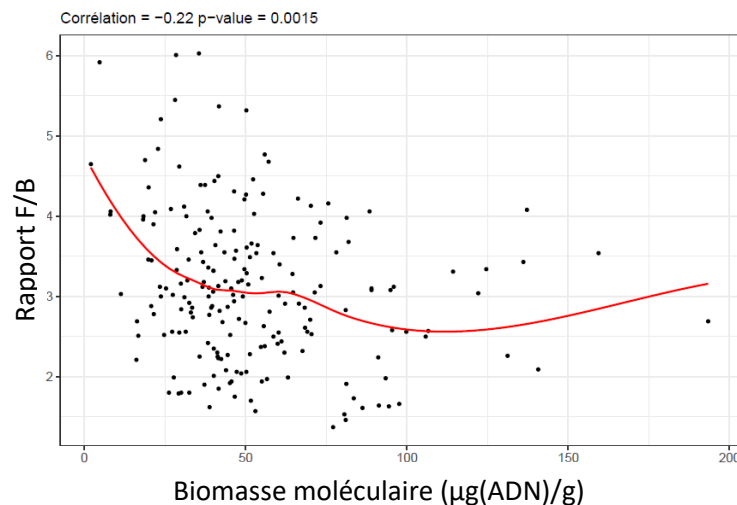


Figure 8: Corrélation entre la valeur du rapport F/B et les valeurs de biomasse microbienne moléculaire.

Ces corrélations appuient de nouveau l'hypothèse de la redondance entre les activités enzymatiques. Le taux en carbone organique est également positivement corrélé à la biomasse microbienne moléculaire ($P = 0.74$; $p\text{-value} < 0.001$) (Fig.9). Ces relations sont en adéquation avec la littérature (Karimi et al. 2018). L'augmentation de carbone organique du sol étant synonyme d'une augmentation de matière organique, son augmentation entraîne une augmentation de l'abondance et de l'activité de ces microorganismes.

Le pH quant à lui est négativement corrélé aux indicateurs microbiens. On observe une corrélation négative du pH et de la diversité bactérienne (nb OTU) ($P = -0.55$; $p\text{-value} < 0.001$). On observe le même type de relation avec la diversité fongique (nb OTU) ($P = -0.36$; $p\text{-value} < 0.001$). Les abondances fongiques et bactériennes exprimées en nombre de copies des gènes 18S et 16S, respectivement, ne présentent pas de fortes relations avec le pH (respectivement : $P = -0.11$, $p\text{-value} = 0.11$; $P = 0.17$; $p\text{-value} = 0.02$). En revanche le rapport F/B présente une corrélation négative significative avec le pH ($P = -0.49$; $p\text{-value} < 0.001$). Lorsque le pH est acide, on observe des valeurs de F/B plus élevées. Si le pH s'alcalinise, on observe une diminution des valeurs de F/B (Fig.10). Bååth et Anderson (2003) montrent la même relation entre le rapport F/B et le pH. Cette relation s'explique par une plus grande sensibilité des bactéries face au pH acide, celles-ci préférant des pH neutres à légèrement alcalin. Les champignons quant à eux sont plus ubiquistes (Rousk et al. 2010).

Les activités enzymatiques et le carbone microbien sont eux positivement corrélés au pH (respectivement : $P = 0.68$, $p\text{-value} < 0.001$; $P = 0.57$, $p\text{-value} < 0.001$). Une forte activité enzymatique est observée lorsque le pH passe au-dessus de 8 (Fig.11a). Il en est de même pour le carbone microbien (Fig.11b). Kamini et al. (2018), dans leur atlas, définissent également le pH comme un facteur favorisant l'abondance des microorganismes, plus précisément des bactéries. Cela signifie que les situations avec un pH plus neutre à légèrement alcalin sont celles avec une abondance bactérienne plus élevée. A contrario, les situations les plus acides tendent à favoriser les champignons.

L'ensemble des relations mises en évidence dans ce travail sont cohérentes avec la littérature scientifique, validant ainsi la pertinence de nos mesures, des différents indicateurs présents dans Agro-Eco Sol et les conclusions que nous pouvons en tirer.

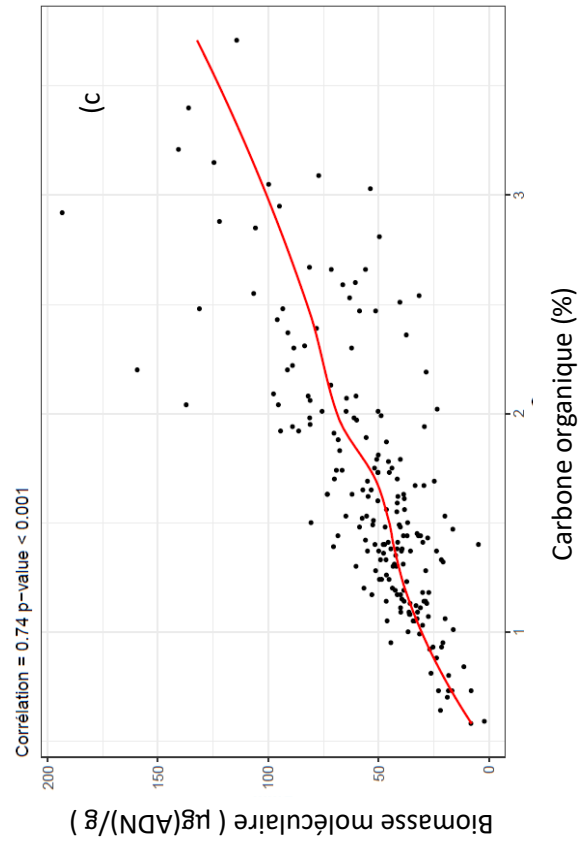
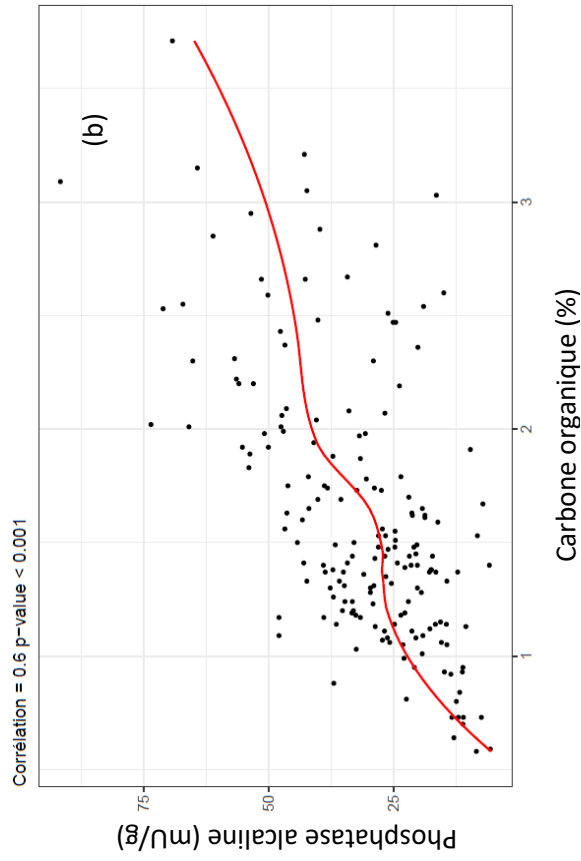
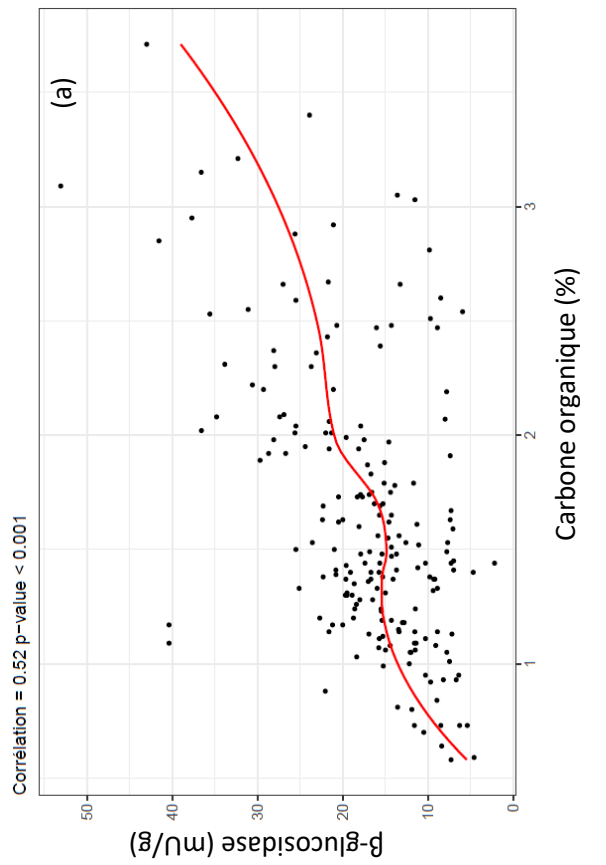


Figure 9 : Corrélations du facteur carbone organique du sol et les indicateurs associés. (a) Corrélation carbone organique et activité de l'enzyme beta-glucosidase. (b) Corrélation carbone organique et activité de l'enzyme phosphatase alcaline. (c) Corrélation carbone organique et biomasse microbienne moléculaire.

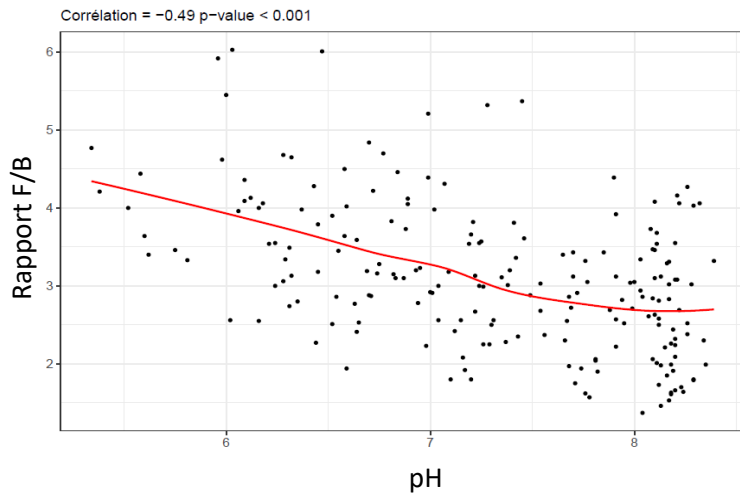


Figure 10 : Corrélation pH et rapport abondance fongique sur bactérienne (F/B).

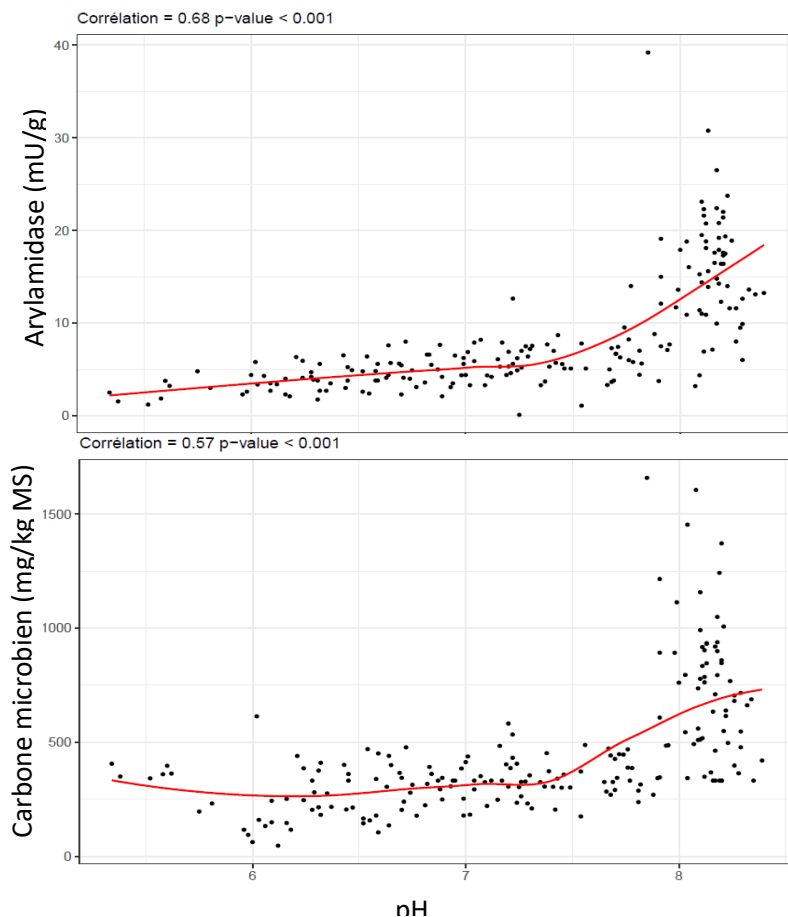


Figure 11 : Corrélation entre le facteur explicatif pH et les indicateurs liés. (a) Corrélation entre le pH et l'activité de l'enzyme Arylamidase. (b) Corrélation entre le pH et le carbone microbien.

Impact des pratiques agricoles

Le dernier point de ce travail s'intéresse aux impacts des pratiques agricoles sur les indicateurs de l'outil suivant différents postulats de la littérature scientifique.

L'évaluation de la pratique de travail du sol montre une augmentation significative de la médiane du carbone organique du sol dans les modalités sans labour (test T ; p-value = 0.0204). Cette même augmentation est observée pour l'azote (test T ; p-value = 0.012) (Fig.12). Ces observations sont cohérentes avec celle de Sun et al. (2011). Cependant, il est important de rappeler que les prélèvements Agro-Eco Sol se font sur une profondeur de 20 cm. Lorsque la profondeur d'étude augmente, les teneurs en carbone et azote ne diffèrent plus selon les traitements (Mary et al. 2018).

Le second postulat dit que la réduction du travail du sol favorise les microorganismes du sol (Dequiedt et al. 2020). Il n'y a pas de différences significatives observées pour la biomasse microbienne moléculaire et le rapport F/B entre des modalités avec et sans labour. La biomasse moléculaire présente une tendance à l'augmentation à la limite de la significativité en sans labour (test T ; p-value = 0.0508). Les valeurs du rapport F/B ne se différencient pas avec des médianes aux alentours de 2,5 (test T ; p-value = 0.424) (Fig. 13a.b.). La biomasse moléculaire microbienne est à la limite de la significativité ; ceci vient très sûrement d'un jeu de données relativement faible, avec seulement 8 paires de modalités issues de 3 sites d'essais de longue durée. Nous pouvons tout de même avancer que les résultats de nos mesures suivent la même tendance que celles décrites dans la littérature et que les conseils issus de ces résultats seront pertinents. En revanche, dans le cas du rapport F/B, nos mesures diffèrent des conclusions de la littérature. Comme l'ont montré dans leurs travaux Helgason, Walley, et Germida (2009) le ratio F/B tend à augmenter lorsque le travail du sol est réduit.

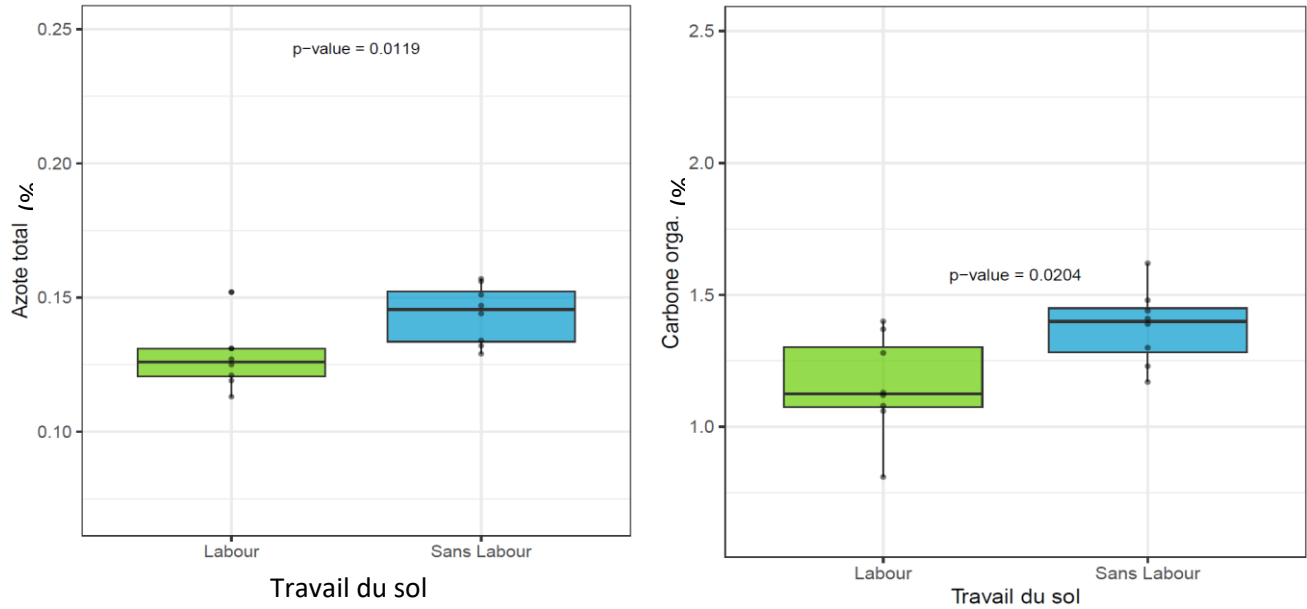


Figure 12: Comparaison des pratiques avec et sans labour pour les indicateurs azote total (a) et carbone organique du sol (b).

Le dernier postulat concerne l'impact négatif du labour sur les vers de terre (Boström 1995; Chan 2001; Peigné et al. 2009). Les abondances et biomasses de vers de terre augmentent significativement en situation de non-labour. La médiane de l'abondance des vers de terre passe de 88 individus au mètre carré en labour à 197 ind/m² en sans labour (test T ; p-value = 0.002) (Fig.13c), soit une augmentation de +130 individus au mètre carré. La médiane de la biomasse évolue de 297 kg/ha de vers de terre en labour à 933 kg/ha en sans labour (test T ; p-value = 0.012) (Fig.13d), soit une augmentation de +460 kg/ha en moyenne. Malgré un jeu de données restreint les résultats sont sans équivoque.

Les tests de variance pour l'implantation des cultures intermédiaires ne montrent pas de différences significatives. Ceci s'explique par un jeu de données très faible, seulement 5 paires de modalités réparties sur 4 sites d'essais longue durée. Cependant, des tendances apparaissent pour la diversité des carabes et des collemboles, bien que les différences observées graphiquement ne soient pas significatives (respectivement : test T ; p-value = 0.176 ; p-value = 0.145) (Fig.14). Ces tendances suivent les résultats illustrés dans la littérature, l'implantation de couvert intermédiaire favorise la faune des sols agricoles (Joimel et al. 2017).

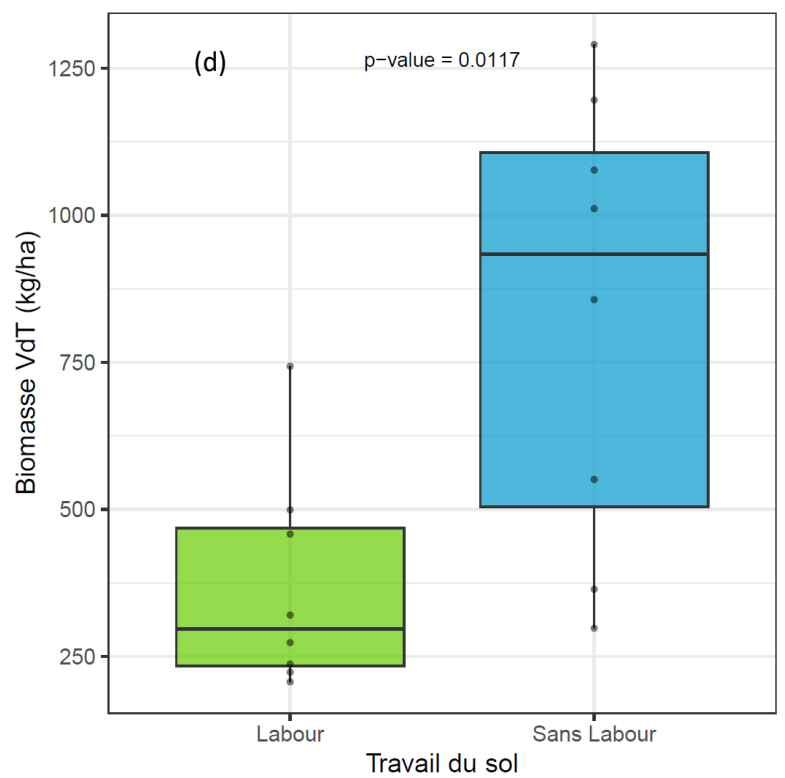
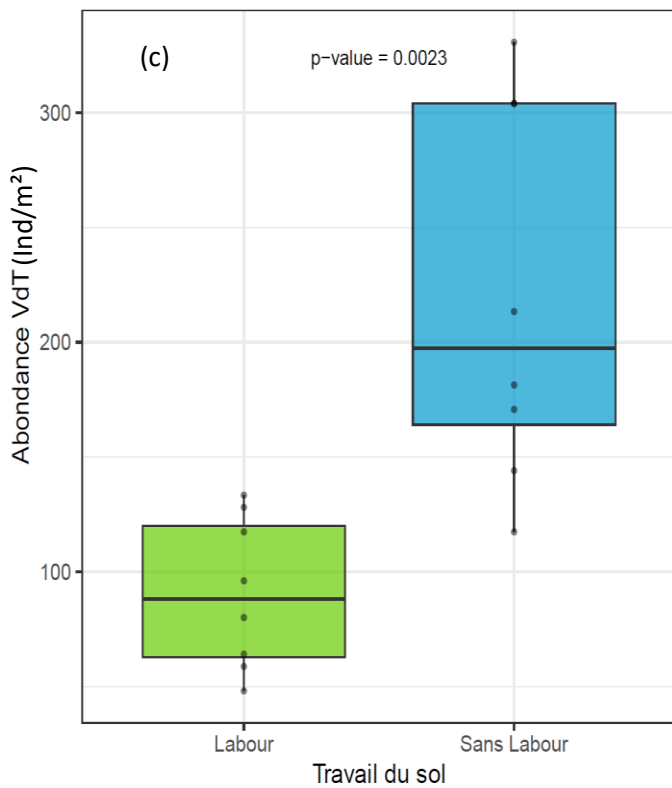
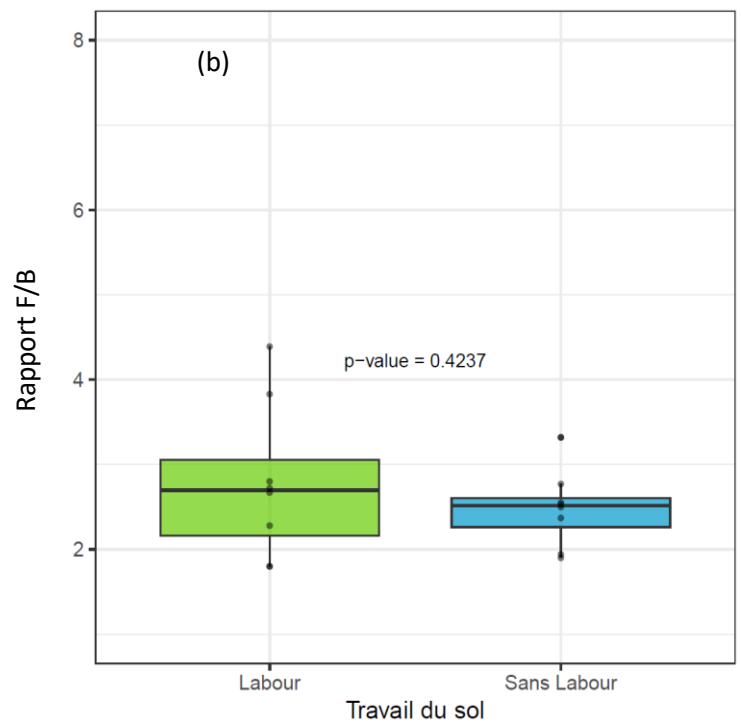
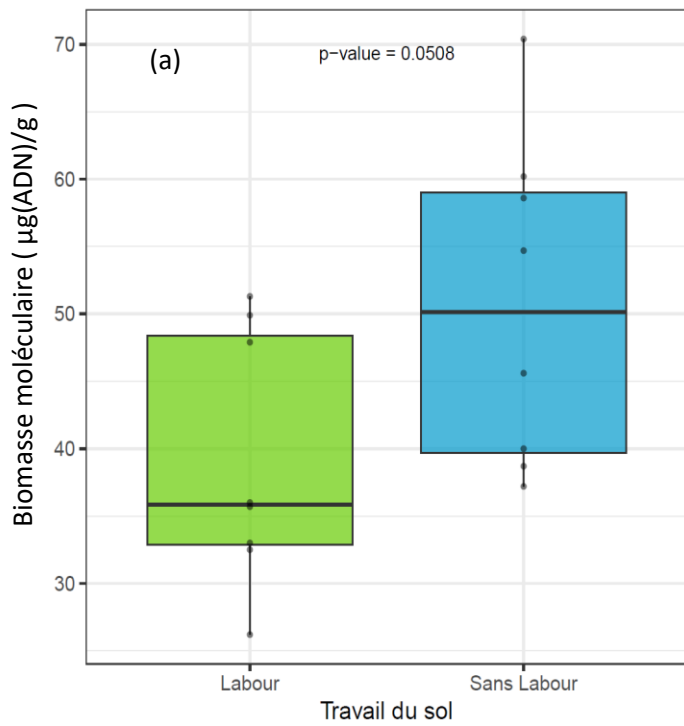


Figure 13 : Comparaison des pratiques avec et sans labour les valeurs de biomasse microbienne moléculaire (a), les valeurs du rapport F/B (b), l'abondance moyenne des vers de terre (ind/m²) (c) et les biomasse moyenne de vers de terre (kg/ha) (d).

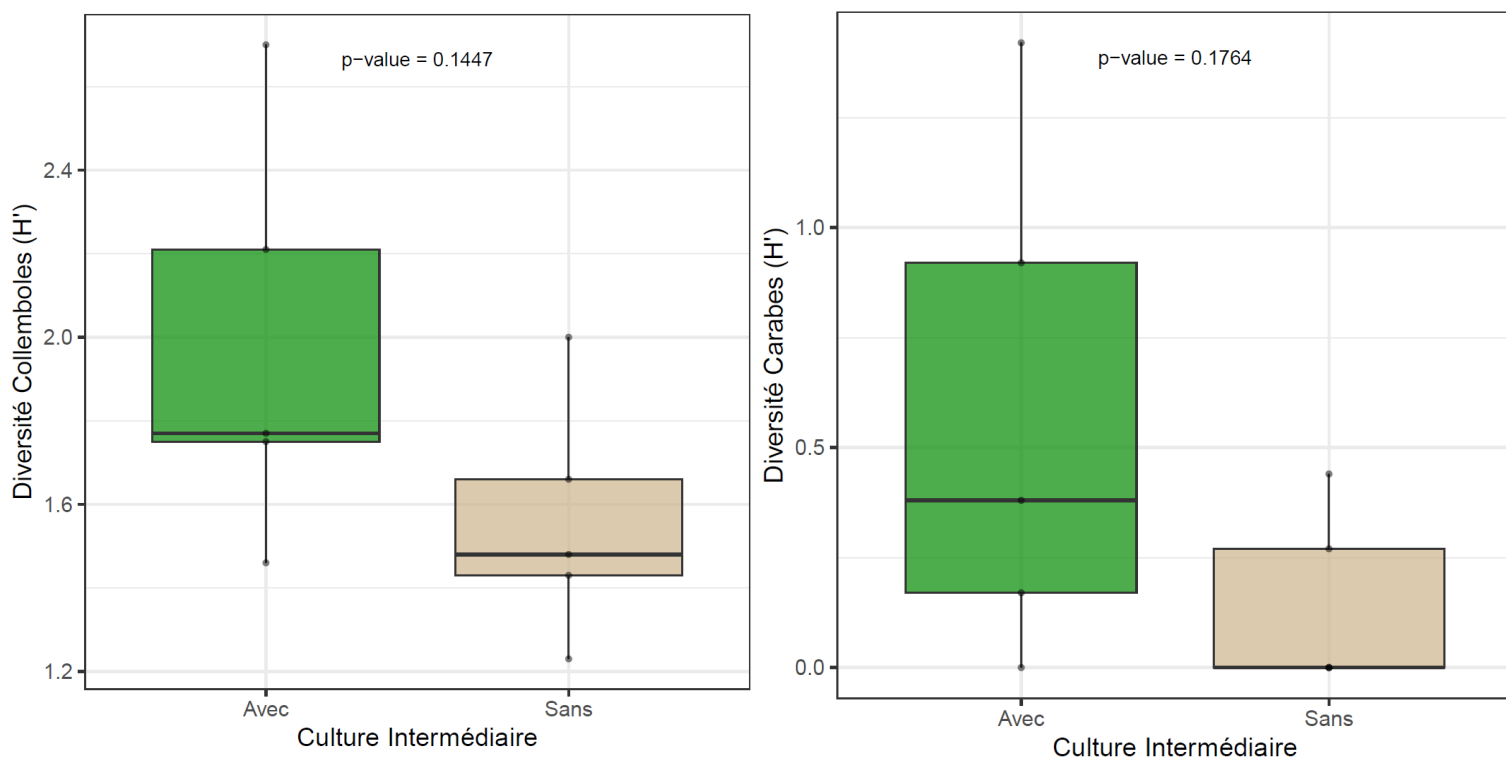


Figure 14 : Comparaison des valeurs de diversité moyenne de collemboles (a) et de carabes (b) dans des situations avec et sans cultures intermédiaires.

CONCLUSION

Les mesures réalisées dans l'outil d'aide à la décision Agro-Eco Sol sont validées. Celles-ci correspondant à leurs référentiels respectifs, nous pouvons confirmer la qualité des mesures. Si nous pouvons valider nos mesures grâce aux référentiels initiaux, nous pouvons également valider ces référentiels grâce aux mesures réalisées dans les essais longue durée, celles-ci ayant été faites dans un panel de conditions environnementales diverses et représentatives des systèmes agricoles. Nous pouvons également valider la pertinence de nos mesures puisque nous n'observons peu, voire pas, de redondance entre indicateurs. De plus, les relations décrites par la littérature sont observées dans notre base de données complète. Il en est de même pour les impacts des pratiques agricoles. L'ensemble de ces points nous confortent quant à la validité des interprétations des performances des sols agricoles et aux conseils fournis par l'outil Agro-Eco Sol. Sur cette base positive, l'évaluation des liens entre fonctions du sol et les indicateurs associés, ainsi que les conseils issus du diagnostic de performance de ces mêmes fonctions se poursuit et fait l'objet d'un travail plus approfondi.

BIBLIOGRAPHIE

- Bååth, E., et T.-H. Anderson. 2003. « Comparison of Soil Fungal/Bacterial Ratios in a pH Gradient Using Physiological and PLFA-Based Techniques ». *Soil Biology and Biochemistry* 35 (7): 955-63. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00154-8).
- Borcard, Daniel, Francois Gillet, et Pierre Legendre. 2011. *Numerical Ecology with R*. New York, NY: Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7976-6>.
- Boström, Ullalena. 1995. « Earthworm Populations (Lumbricidae) in Ploughed and Undisturbed Leys ». *Soil and Tillage Research* 35 (3): 125-33. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00489-0](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00489-0).
- Bouthier, Alain, Céline Pelosi, Cécile Villenave, Guénola Pérès, Mickaël Hedde, L. (INRA, J. (ISARA, et al. 2014. « Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique ». In .
- 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 (4): 179-91. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00173-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00173-2).
- Clivot, Hugues, Bruno Mary, Matthieu Valé, Jean-Pierre Cohan, Luc Champolivier, François Piraux, François Laurent, et Eric Justes. 2017. « Quantifying in Situ and Modeling Net Nitrogen Mineralization from Soil Organic Matter in Arable Cropping Systems ». *Soil Biology and Biochemistry* 111 (août): 44-59. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.010>.
- Culman, Steven W., Sieglinde S. Snapp, Mark A. Freeman, Meagan E. Schipanski, Josh Beniston, Rattan Lal, Laurie E. Drinkwater, et al. 2012. « Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction That Is Sensitive to Management ». *Soil Science Society of America Journal* 76 (2): 494-504. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>.
- Dequiedt, S, B Karimi, N Chemidlin Prévost-Bouré, S Terrat, W Horrigue, C Djemiel, M Lelievre, et al. 2020. « Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français ». *Etude et Gestion des Sols*, 22.
- Gattinger, Andreas, Adrian Muller, Matthias Haeni, Colin Skinner, Andreas Fliessbach, Nina Buchmann, Paul Mäder, et al. 2012. « Enhanced top soil carbon stocks under organic farming ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (44): 18226-31. <https://doi.org/10.1073/pnas.1209429109>.
- Helgason, Bobbi L, Fran L Walley, et James J Germida. 2009. « Fungal and Bacterial Abundance in Long-Term No-Till and Intensive-Till Soils of the Northern Great Plains » 73 (1).
- Horrigue, Walid, Samuel Dequiedt, Nicolas Chemidlin Prevost-Boure, Claudy Jolivet, Nicolas Saby, Dominique Arrouays, Antonio Bispo, Pierre-Alain Maron, et Lionel Ranjard. 2016. « Predictive model of soil molecular microbial biomass ». *Ecological Indicators* 64 (mai): 203-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.004>.
- Joimel, Sophie, Christophe Schwartz, Mickaël Hedde, Sayuri Kiyota, Paul Henning Krogh, Johanne Nahmani, Guénola Pérès, Alan Vergnes, et Jérôme Cortet. 2017. « Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality - ScienceDirect ». 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717300967?via%3Dihub>.
- Karimi, Battle, Nicolas Chemidlin Prevost-Boure, Samuel Dequiedt, Sebastien Terrat, et Lionel Ranjard. 2018. *Atlas français des Bactéries du sol*.
- Landesman, William J., et John Dighton. 2011. « Shifts in Microbial Biomass and the Bacteria: Fungi Ratio Occur Under Field Conditions Within 3 h After Rainfall ». *Microbial Ecology* 62 (1): 228-36. <https://doi.org/10.1007/s00248-011-9811-1>.
- Le Souder, Christine, Matthieu Vale, Florent Chlebowski, Lionel Ranjard, Alain Maron, Samuel Dequiedt, Mickaël Hedde, et al. 2021. « Agro-Eco Sol, un outil de diagnostic des fonctions du sol basé sur des bioindicateurs ; structure et règles générales d'interprétation ». Coll. COMIFER-GEMAS nov.



2021.

- Mary, Bruno, Fabien Ferchaud, Florent Chlebowski, et Nicolas Blaszczyk. 2018. « Monitoring SOC Changes in the Long-Term Experiment of Boigneville Shows No Effect of Tillage after 47 Years ». *ISTRO 2018* : 154-155
- Peigné, J., M. Cannavaciolo, Y. Gautronneau, A. Aveline, J.L. Giteau, et D. Cluzeau. 2009. « Earthworm Populations under Different Tillage Systems in Organic Farming ». *Soil and Tillage Research* 104 (2): 207-14. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.02.011>.
- Peigné, Josephine, et al. 2016. « Test Bêche - Guide d'utilisation ».
- Rousk, Johannes, Erland Bååth, Philip C Brookes, Christian L Lauber, Catherine Lozupone, J Gregory Caporaso, Rob Knight, et Noah Fierer. 2010. « Soil Bacterial and Fungal Communities across a pH Gradient in an Arable Soil ». *The ISME Journal* 4 (10): 1340-51. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.58>.
- Sakamoto, Kazunori, et Yutaka Oba. 1994. « Effect of Fungal to Bacterial Biomass Ratio on the Relationship between CO₂ Evolution and Total Soil Microbial Biomass ».
- Schlüter, Steffen, Caroline Großmann, Julius Diel, Gi-Mick Wu, Sabine Tischer, Annette Deubel, et Jan Rücknagel. 2018. « Long-Term Effects of Conventional and Reduced Tillage on Soil Structure, Soil Ecological and Soil Hydraulic Properties ». *Geoderma* 332 (décembre): 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.001>.
- Sun, Benhua, Paul D Hallett, Sandra Caul, Tim J Daniell, et David W Hopkins. 2011. « Distribution of Soil Carbon and Microbial Biomass in Arable Soils under Different Tillage Regimes ». *Plant Soil*.
- Terrat, Sebastien, Pierre Plassart, Emilie Bourgeois, Stéphanie Ferreira, Samuel Dequiedt, Nathalie Adele-Dit-De-Renseville, Philippe Lemanceau, et al. 2015. « Meta-barcoded Evaluation of the ISO Standard 11063 DNA Extraction Procedure to Characterize Soil Bacterial and Fungal Community Diversity and Composition ». *Microbial Biotechnology* 8 (1): 131-42. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12162>.

