

PERTINENCE DE NOUVEAUX INDICATEURS POUR EVALUER L'IMPACT DES PRATIQUES CULTURALES SUR LE FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DES SOLS

Matthieu VALÉ⁽¹⁾, Alain BOUTHIER⁽²⁾, Robert TROCHARD⁽³⁾, Rémi CHAUSSOD⁽⁴⁾, Rachida NOUAÏM-CHAUSSOD⁽⁵⁾,

¹ Groupe SAS Laboratoire / AGRO-Systèmes – 270 avenue de la Pomme de Pin – 45160 ARDON – mvale@saslaboratoire.com

² ARVALIS Institut du Végétal - Station du Magneraud - 17700 Saint Pierre d'Amilly – a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr

³ ARVALIS Institut du Végétal - Station expérimentale de La Jaillièrre - 44370 La Chapelle Saint Sauveur r.trochard@arvalisinstitutduvegetal.fr

⁴ INRA DIJON - UMR Microbiologie des sols et de l'environnement - 17, rue Sully BP 86510 - 21065 Dijon cedex - remi.chaussod@dijon.inra.fr

⁵ SEMSE (Service et Etudes en Microbiologie des Sols et de l'Environnement) - 2 chemin du lavoir - 21310 Viévigne – contact@semse.fr

I. Pourquoi s'intéresser au fonctionnement biologique des sols ?

Le sol est un des composants majeurs des systèmes de productions agricoles. C'est un milieu vivant et complexe, qui permet d'assurer des conditions favorables à la croissance des cultures s'il est en bon état physique, chimique et biologique (mise à disposition des éléments nutritifs, structure du sol, rétention de l'eau, ...). Cette fonction de productivité n'est cependant pas l'unique composante de la qualité biologique d'un sol : il y a également l'état sanitaire, les externalités environnementales et la résilience (CHAUSSOD, 1996). L'état sanitaire caractérise la capacité d'un sol à s'opposer au développement de certains parasites telluriques : piétin échaudage, rhizoctone... Les externalités environnementales se rapportent à tout impact sur les aquifères et l'atmosphère à l'interface desquels le sol se situe. Enfin, la résilience se définit comme la capacité du sol à se rétablir après une perturbation.

Tout comme l'observation sur le terrain, l'analyse de terre est un outil indispensable pour appréhender la qualité d'un sol. Les analyses de terre sont ainsi utilisées pour raisonner la fertilisation des cultures et entretenir, voir améliorer, certaines propriétés des sols. Les analyses de terre classiques permettent d'appréhender les composantes chimiques de la fertilité des sols, qui déterminent la biodisponibilité des éléments nutritifs et le statut acido-basique. Les composantes physiques et surtout biologiques sont par contre insuffisamment prises en compte par les analyses de terre classiques.

Les organismes vivants du sol, notamment les micro-organismes, sont pourtant essentiels à de très nombreuses fonctions du sol (BERTHELIN, 2007) :

- Ils agissent sur la dégradation des matières organiques et donc sur la libération des nutriments ou la production de forme assimilables
- Ils permettent le fonctionnement des cycles biogéochimiques (certaines étapes étant totalement déterminées ou régulées par les microorganismes)
- Ils permettent le recyclage des éléments, l'altération et la néoformation des minéraux
- Ils servent d'interface entre les racines et le sol par des associations symbiotiques ou non
- Ils jouent un rôle sur les polluants par biosorption, biodégradation ou bioaccumulation
- Ils participent à la structuration du sol et la stabilisent.

II. Qualité biologique des sols : quels indicateurs pour quelles attentes ?

La pertinence d'un indicateur de la qualité biologique des sols dépend du besoin de son utilisateur. Ainsi, l'agriculteur rechercherait avant tout un outil de diagnostic de l'état biologique de son sol, ainsi qu'un moyen d'expliquer un problème de production et d'y remédier (Figure 1). Cela implique que l'indicateur soit accessible (mesurable en routine) et interprétable à l'aide d'un référentiel. Cette utilisation très finalisée n'est cependant pas la seule. Ainsi, un chercheur ou un expérimentateur

voudra un indicateur sensible au facteur étudié, dans le but d'améliorer la compréhension des processus biologiques. L'analyse en routine et le référentiel d'interprétation ne sont alors pas indispensables. Enfin des structures de développement et de conseil agricole voudront des indicateurs donnant des critères objectifs pour évaluer la pertinence d'un changement de système de culture (agriculture de conservation, semis direct, TCSL,). La mesure en routine est nécessaire, l'interprétation des résultats peut se faire en comparatif (construction du référentiel).

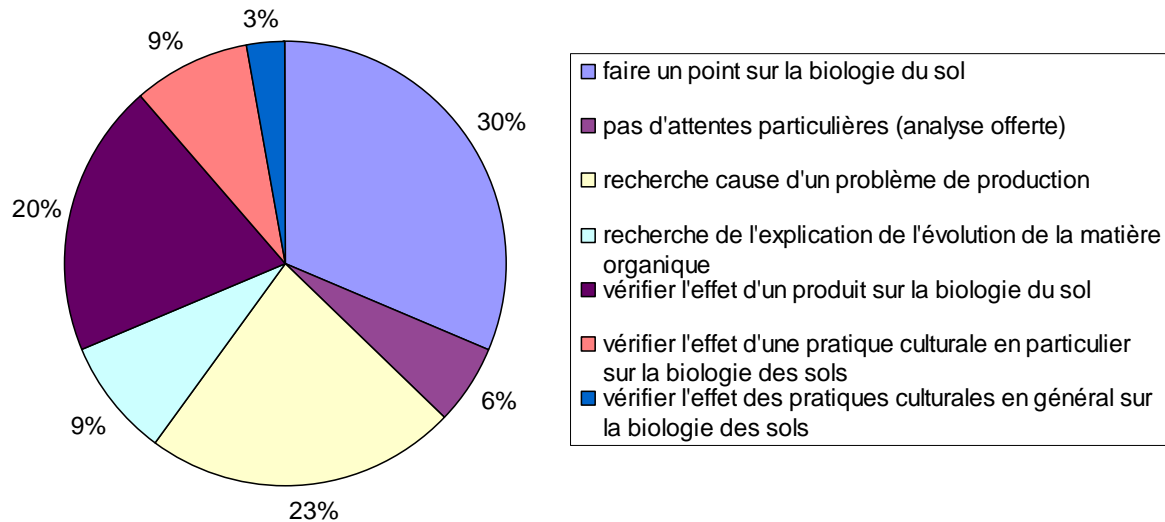


Figure 1 : Attentes des agriculteurs vis-à-vis des analyses de la qualité biologique des sols (question posée en 2009 à une centaine d'agriculteurs clients du groupe AGRO-Systèmes / SAS Laboratoire ayant réalisé une analyse biologique de sol)

Les indicateurs de la qualité biologique de sols peuvent ainsi être classés en 3 catégories, par ordre d'opérationnalité croissante.

- Indicateurs de recherche / expérimentation : ils sont pertinents par rapport à une composante identifiée de la qualité biologique des sols et y font explicitement référence. La méthode de mesure est fiable et reconnue au niveau international. Ces indicateurs peuvent par exemple servir au paramétrage de modèles, par exemple la fraction décomposable de la matière organique du modèle STICS, rapport carbone actif sur carbone organique total du modèle AMG (BOUTHIER *et al*, 2011)
- Indicateurs d'évaluation / de suivi : en plus des caractéristiques des indicateurs de recherche, ils sont mesurables en routine de façon précise, reproductible et accessible à un coût abordable. La méthode de mesure est normalisée. Le référentiel d'interprétation n'étant pas complètement établi, ils sont utilisés de préférence en comparatif et à posteriori (impact de l'apport d'un produit organique en comparaison avec une fertilisation minérale par exemple).
- Indicateurs de diagnostic : Le référentiel d'interprétation est suffisant et validé. Il peut donc être utilisé à priori et sans comparatif pour faire l'état des lieux d'une situation, détecter un problème (ou pas) et proposer la solution pour y remédier si besoin.

Les indicateurs de la qualité biologique des sols issus de la recherche sont nombreux, certains ont été normalisés mais très peu (voire aucun) disposent d'un référentiel d'interprétation validé dans les divers contextes agropédoclimatiques français. L'acquisition de données nécessaires à la constitution d'un tel référentiel représente un investissement conséquent en temps et en argent. Il est donc nécessaire de sélectionner parmi les indicateurs de recherche ceux qui semblent les plus prometteurs et de tester leur pertinence à évaluer l'impact des pratiques culturales sur le fonctionnement biologique des sols (CHAUSSOD et NOUAIM, 2001). ARVALIS Institut du Végétal, en partenariat avec le groupe SAS Laboratoire / AGRO-Systèmes et la société SEMSE (Service et Etudes en Microbiologie des Sols et de l'Environnement), a ainsi testé 6 biodescripteurs sur des dispositifs d'essais de longue durée : la biomasse microbienne (méthode fumigation / extraction), le fractionnement granulométrique de la matière organique, les potentiels de minéralisation carbone et azote, l'activité enzymatique FDA Hydrolase, les métabolites microbiens par autoclavage et les aptitudes métaboliques à l'aide de plaques biolog®.

III. Indicateurs de qualité biologique des sols retenus

Les indicateurs retenus présentent des stades de développement différents :

- Les trois premiers indicateurs présentent des méthodes validées (normalisées) et sont potentiellement des indicateurs d'évaluation : la biomasse microbienne (d'après la NF EN ISO 14240-2), le fractionnement de la matière organique (d'après la NF X31-516) et les potentiels de minéralisation carbone et azote (dérivés de la XP U44-163).
- Les trois autres sont des indicateurs de recherche qui n'ont pas de protocole normalisé mais semblent prometteurs pour des utilisations plus opérationnelles (pertinence des fonctions étudiées et mise en routine possible) : l'activité enzymatique FDA Hydrolase, les métabolites microbiens par autoclavage et les aptitudes métaboliques

Le choix s'est porté sur des indicateurs mesurables au laboratoire, donc centrés sur les micro-organismes et leurs fonctions. Les indicateurs portant sur les macro-organismes (vers de terre, arthropodes, insectes) pourraient également être pertinents pour discriminer les pratiques culturales (CLUZEAU *et al.*, 2001) mais ce sont des indicateurs plus adaptés aux praticiens de terrain qu'aux laboratoires d'analyse de terre. Le choix d'indicateurs microbiologiques se justifie également par le rôle prépondérant des micro-organismes dans le cycle des matières organiques (stockage de carbone, libération des éléments minéraux assimilables par les plantes comme l'azote) qui peut être plus ou moins directement relié à la fonction de productivité d'un sol.

La microbiologie du sol peut s'appréhender sous 3 aspects que sont l'abondance, l'activité et la diversité. L'abondance est la quantité de micro-organismes, c'est-à-dire la fraction de matière organique vivante. L'activité est l'intensité des fonctions que peut avoir cette fraction vivante. Enfin, la diversité peut concerner les espèces, les gènes ou leurs expressions (fonctions ou aptitudes métaboliques). Les indicateurs retenus englobent ces 3 aspects :

- Abondance / caractérisation MO → Biomasse microbienne, Fractionnement de la matière organique, Métabolites microbiens
- Activité microbienne → Potentiels de minéralisation carbone et azote, Activité enzymatique FDA hydrolase
- Diversité fonctionnelle → Aptitudes métaboliques

III - a. Trois indicateurs normalisés

- La biomasse microbienne (d'après la NF EN ISO 14240-2) : La fumigation de terre brute par des vapeurs de chloroforme permet de détruire les cellules des micro-organismes vivants. Le carbone organique contenu dans ces cellules est alors extrait : c'est le carbone microbien ou biomasse microbienne. Le résultat s'exprime en mg C microbien par kg de terre sèche mais également en pourcentage de la matière organique totale du sol (généralement entre 0.5 et 4 % de la MO). La biomasse microbienne représente la fraction vivante de la matière organique (MOV).
- Le fractionnement granulométrique de la matière organique (d'après la NF X31-516) : la terre séchée et émiettée à 2 mm est tamisée sous eau à 50 et 200 µm. Le carbone organique et l'azote total sont déterminés sur les 3 fractions obtenues, par la mesure sur les fractions 50-200 µm et 200-2000 µm, par le calcul sur la fraction 0-50 µm. La proportion de carbone organique et d'azote total dans chacune des fractions, ainsi que leur rapport C/N respectif, permettent une caractérisation fine de la matière organique du sol. La fraction fine (0-50 µm) est considérée comme la matière organique humifiée (stable). Les fractions grossières sont assimilées à la matière organique labile (50-200 µm) et la matière organique fraîche issue des résidus de culture (200-2000 µm).
- Les potentiels de minéralisation carbone et azote (dérivés de la XP U44-163) : la terre brute est mise à incuber à 28°C et humidité constante pendant 28 jours. La minéralisation du carbone organique est mesurée par piégeage dans la soude du CO₂ produit par la respiration microbienne. La minéralisation de l'azote organique est mesurée par la variation du stock d'azote minéral extrait au KCl. Les quantités de carbone et d'azote minéralisés en 28 jours sont exprimées en mg/kg de terre sèche ou en pourcentage du carbone organique et de l'azote total.

III - b. Trois indicateurs en évaluation

III - b - 1. Métabolites microbiens par autoclavage

Un pool labile de carbone (identifié comme étant principalement des métabolites microbiens) est extrait à l'eau chaude (120°C) sous pression équilibrante (autoclavage à 1 bar). L'extraction à l'autoclave est basée sur la désorption-solubilisation des matières organiques labiles par l'eau chaude sous pression équilibrante (LEMAITRE *et al.*, 1995a et 1995b).

III - b - 2. Activité enzymatique FDA Hydrolase

La fluorescéine diacétate (FDA) est une molécule qui peut être hydrolysée par de nombreuses enzymes dont les estérases, les protéases et les lipases microbiennes. L'hydrolyse de la FDA est donc une activité enzymatique généraliste, avec un spectre d'action beaucoup plus large que d'autres activités enzymatiques spécifiques, comme la phosphatase alcaline par exemple. L'activité FDA est déterminée par la mesure de l'absorbance à 490nm de la fluorescéine libérée par hydrolyse du substrat (SCHNÜRER and ROSSWALL, 1982 ; GREEN *et al.*, 2006). L'activité FDA hydrolase est généralement corrélée à la biomasse microbienne ou à une activité biologique globale et cet indicateur rend bien compte d'une stimulation par apport de matières organiques (SANCHEZ MONDENERO *et al.*, 2008).

III - b - 3. Aptitudes métaboliques

Ce test consiste à mesurer l'aptitude de la microflore du sol à utiliser pour sa croissance des substrats différents : substrats carbonés simples (sucres, acides carboxyliques...) ou complexes (polymères), substrats azotés (acides aminés, amines), etc. Cela permet d'obtenir un profil physiologique de la communauté microbienne d'un sol. Cet indicateur a vocation à rendre compte de la biodiversité fonctionnelle de la microflore.

IV. Dispositifs expérimentaux utilisés

Les biodescripteurs retenus ont été évalués sur des dispositifs d'essais de longue durée regroupant plusieurs thématiques :

- Apport de produits résiduels organiques (PRO) sur les essais de La Jaillière (44), du Rheu (35) et de Jeu les Bois (36)
- Mise en place de CIPAN sur les essais de Thibie (51), Kerlavic (29), Boigneville (91)
- Travail du sol sur les essais de Boigneville (91) et de St Exupéry (69)
- Agriculture biologique sur les essais d'Etoile sur Rhône (26) et de La Motte (95)
- niveaux d'intensification sur l'essai de St Exupéry (69)

Les 6 essais avec apports de PRO sur 3 sites ont mis en comparaison différents types de PRO issus d'élevages (fumiers bruts ou compostés de bovins, de volailles et de porcins, lisiers de porcs) apportés régulièrement (tous les ans ou tous les 3 ans) dans le but de mieux quantifier les effets directs azote ainsi que leurs effets à long terme en lien avec les modifications du statut organique du sol. Les essais ont été mis en place entre 1995 et 1999 et ont duré 10 ans. Les prélèvements de sols pour les analyses d'indicateurs biologiques ont eu lieu les années qui ont suivi l'arrêt des essais.

Les 3 essais CIPAN ont comparé sur des périodes de 13 à 17 ans, la mise en place d'une CIPAN (moutarde, ray-grass ou radis selon les essais et les intercultures) à un sol laissé nu.

Les 3 essais travail du sol dont la durée varie de 8 (St Exupéry) à plus de 40 ans (Boigneville) comparent le labour au travail superficiel et au semis direct. Dans ces deux derniers traitements, les prélèvements de terre ont eu lieu dans la couche superficielle travaillée et dans l'horizon sous-jacent.

L'essai de St Exupéry, implanté en 2003 en monoculture de maïs irrigué, compare deux niveaux d'intensification (fertilisation, protection) en plus des régimes de travail du sol.

Outre leur répétabilité et reproductibilité au laboratoire, il est important de connaître la variabilité de ces indicateurs dans le temps. Pour ce faire, deux types de dispositifs ont été mis en place sur des parcelles de grandes cultures. La biomasse microbienne a été mesurée tous les mois pendant un

an dans la couche labourée de sols limoneux (50 à 70 % de limons) et argilo-calcaire (45 % d'argile, 15 % de CaCO₃) dans l'Indre et Loire en 2008-2009. Le fractionnement de la matière organique et les potentiels de minéralisation carbone et azote ont été mesurés plusieurs années de suite sur les essais de longue durée « produits organiques » d'ARVALIS de la Jaillière et du Rheu.

V. Résultats des 4 années d'essais

V - a. Acquis méthodologiques

L'effet discriminant de certains indicateurs tels que le fractionnement granulométrique semble perdurer dans le temps (Figure 2). Ainsi, sur l'essai de La Jaillière, 4 ans après l'arrêt des apports de produits organiques, la fraction 50-200 µm de la MO différencie toujours en tendance le traitement minéral du traitement fumier composté de bovin.

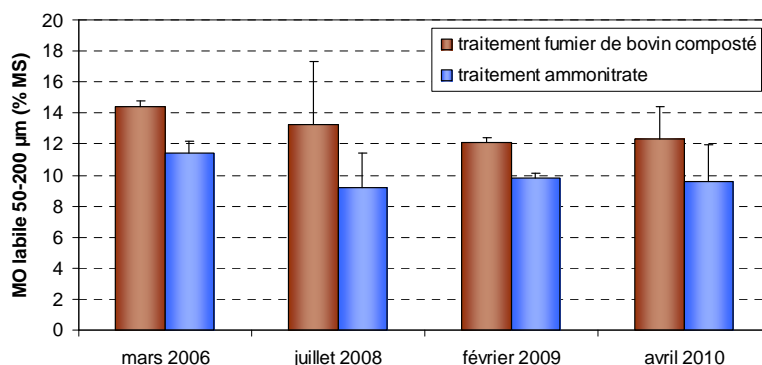


Figure 2 : Fractionnement granulométrique de la matière organique mesuré sur l'essai longue durée « produits organiques » de la station ARVALIS de la Jaillière arrêté en 2006

La variabilité intra-annuelle de la biomasse microbienne semble limitée sur les sols limoneux, mais plus prononcée sur les sols argilo-calcaires (Figure 3). Des suivis en sol de craie (70 % CaCO₃) dans l'Aube en 2010-2011 semblent confirmer la plus forte variabilité de la biomasse microbienne en sol calcaire (parcelles suivies par le CETA de Romilly). Cette variabilité est sous l'influence de plusieurs facteurs (BOULOC, 2010) :

- l'humidité du sol : la biomasse microbienne est significativement plus faible quand le sol est sec,
- la température : la biomasse est plus faible quand les températures passent en dessous de 5°C
- l'apport récent de matières organiques : la biomasse augmente fortement après l'enfouissement des résidus de récolte ou la destruction des CIPAN, cet effet durant de 2 à 3 mois.

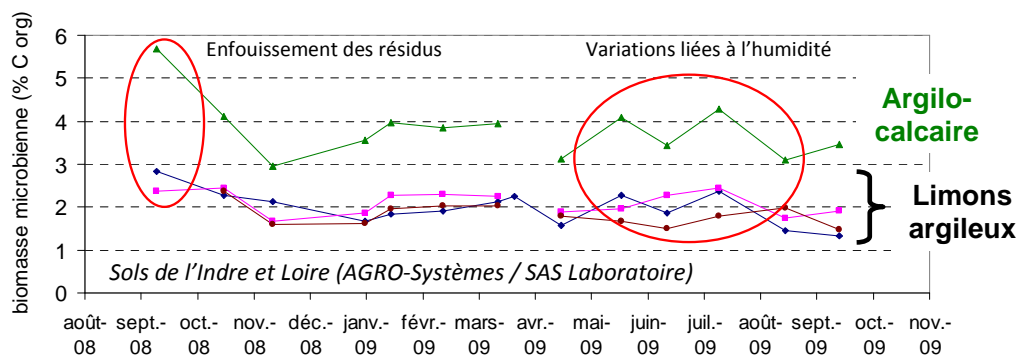


Figure 3 : Evolution de la biomasse microbienne sur des parcelles de grandes cultures

Pour ce type d'analyse, le prélèvement post récolte en même temps que l'analyse de terre classique ne semble pas adapté, sauf pour le fractionnement de la matière organique. Il faut éviter de

prélever pendant ou juste après des périodes de stress hydrique (sécheresse ou saturation en eau) et thermique (gel). Il faut également éviter de prélever moins de 2 mois après un enfouissement de résidus de culture ou un apport d'engrais ou d'amendements organiques. Les périodes idéales pour le prélèvement des indicateurs d'abondance et d'activité biologique sont le printemps et l'automne.

V - b. Pertinence des indicateurs biologiques testés

V - b - 1. Apport d'information par rapport aux indicateurs classiques (C et N organiques)

La plupart des indicateurs testés représentent des fractions plus ou moins labiles de la matière organique du sol. Les résultats, exprimés en mg C /kg de sol sec, sont ainsi bien corrélés avec la teneur en carbone organique du sol ($R^2 = 0.9$ pour la biomasse et les métabolites microbiens). Ces indicateurs biologiques peuvent donc sembler redondants avec les analyses de terre classiques. Cependant, les indicateurs exprimés en pourcentage du carbone organique peuvent se montrer plus sensibles pour discriminer des pratiques culturales. Ainsi sur l'essai de Saint Exupéry, la teneur en carbone organique n'est pas différente entre la conduite « classique » et la conduite à bas niveau d'intrants (Figure 4). En revanche, le fractionnement de la matière organique et le potentiel de minéralisation azote présentent des différences significatives.

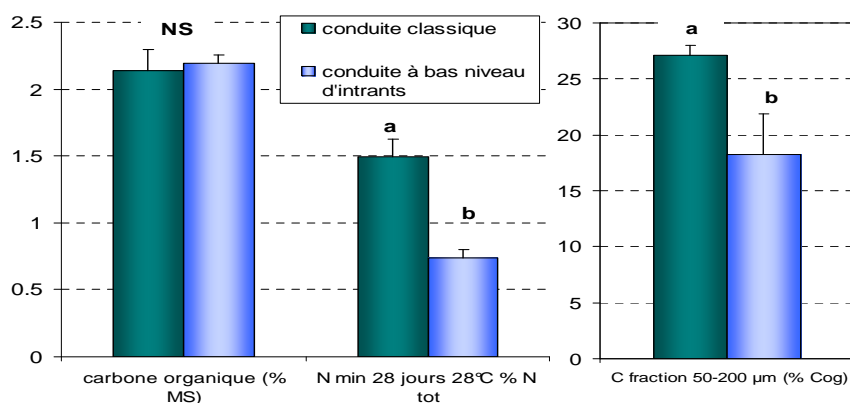


Figure 4 : Indicateurs mesurés sur l'essai rotation de Saint Exupéry

V - b - 2. Effets du contexte pédoclimatique

La variabilité des différents indicateurs entre les sites est plus importante qu'entre les historiques différenciés sur chaque site. Certaines caractéristiques du sol semblent très influentes. Par exemple, la biomasse microbienne, les métabolites microbiens et les fractions grossières de la MO sont plus élevés en sol calcaire. Les effets de caractéristiques de sols peuvent ainsi se surimposer aux effets des pratiques culturales et gêner l'interprétation des biodescripteurs. C'est par exemple le cas pour les essais rotations en agriculture biologique où le pH semble influencer sur la biomasse microbienne, en plus de l'effet culture (Figure 5).

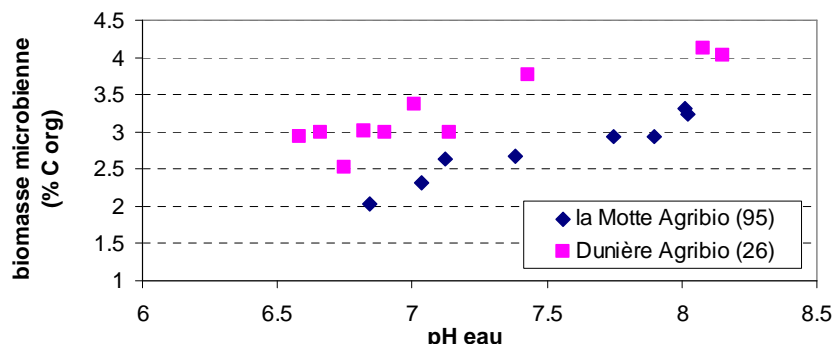


Figure 5 : effet apparent du pH sur la biomasse microbienne sur les essais en agriculture biologique

V - b - 3. Réponses aux historiques culturaux des essais

L'effet des historiques d'apports de Produits Résiduaux Organiques (PRO) a été la pratique la plus étudiée sur les essais de longue durée que nous avons à notre disposition. Les indicateurs classiques (teneur en carbone et azote organiques du sol) ont permis de discriminer les traitements avec et sans apport de PRO (teneurs en C et N plus élevées suite à l'apport de PRO). L'effet dose se retrouve également. Ces apports de PRO n'ont pas engendré de modification significative du rapport C/N du sol, à l'exception de l'essai en prairie temporaire de Ray Grass du site de la Jaillière où l'apport de fumiers de volailles a diminué significativement le C/N de la matière organique de l'horizon 0-25 cm.

Les indicateurs biologiques ont également été pertinents pour discriminer les traitements. L'apport de PRO a résulté en une augmentation de la biomasse microbienne en mg C / kg sol sec. La biomasse microbienne exprimée en % du carbone organique ne s'est pas montrée aussi souvent discriminante, et les effets varient selon les essais et les produits. Les métabolites microbiens exprimés en mg/kg n'ont pas augmenté systématiquement suite à l'apport de PRO, une baisse a même été constatée sur certains essais lorsque le résultat est exprimé en % du carbone organique. La composition granulométrique est aussi modifiée par les apports de PRO. Le carbone et l'azote des apports organiques semblent se stocker préférentiellement dans la fraction fine (0-50 µm), considérée comme humifiée, toutefois la part de la fraction 50-200 µm augmente également. Enfin les potentiels de minéralisation carbone et azote ont également été impactés par les apports de PRO. Les effets se sont montrés variables selon le type de produit organique et les effets n'étaient pas toujours les mêmes sur le carbone et l'azote.

Il semble donc que l'ensemble des indicateurs sont affectés par les apports de PRO, mais la variabilité des effets selon les types de PRO et les essais, suggère une aptitude à discriminer des effets spécifiques lié au type de PRO en interaction avec les conditions agropédoclimatiques.

Tableau 1 : Récapitulatif des effets des pratiques culturales sur les indicateurs biologiques mis en évidence sur les essais de longue durée d'ARVALIS

+ : effet significatif 0 : pas d'effet mis en évidence	Apports de PRO (6 essais)	CIPAN (3 essais)	TCS (0-10 cm) (3 essais)	Prairie/ cultures annuelles (2 essais)	Niveau d'intensification (1 essai)
%C, %N, C/N	+	0 (+ sur C/N)	+	+	0
Fractionnement granulométrique	+	0	0 à +	+	+
Biomasse microbienne	+	0	+	+	+
Métabolites microbiens	+	0	+	+	0
Minéralisation C et N	+	0 à +	+	+	+(N)

Les effets du travail du sol et de la présence de cultures intermédiaires ont également bien été mis en évidence par les indicateurs biologiques (Tableau 1). Les indicateurs normalisés ont été globalement moins discriminants des historiques de CIPAN que des historiques PRO, avec des réponses variables selon les essais. Ainsi l'azote minéralisé en % de l'azote organique est plus élevé en présence d'un historique de CIPAN sur l'essai de Boigneville. Les indicateurs en développement (ici en évaluation) se sont montrés plus performants à discriminer cet historique CIPAN. Ainsi la présence de CIPAN semble favoriser les aptitudes à métaboliser des substrats azotés dans la couche superficielle du sol où ils sont enfouis (Figure 6).

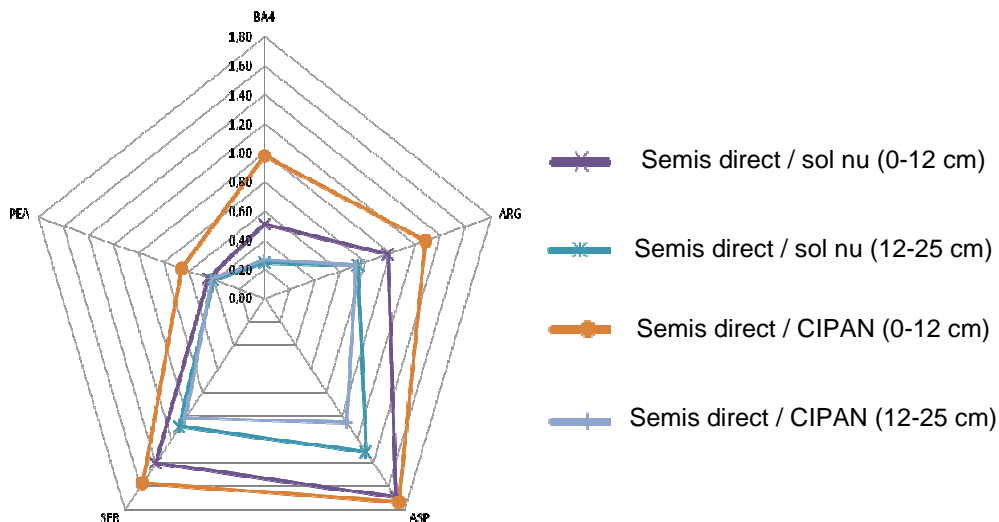


Figure 6 : Aptitudes métaboliques (substrats azotés) dans le site de Boigneville

L'absence de labour a pour effet de concentrer les résidus de cultures et les CIPAN dans la couche superficielle du sol. Sur certains essais, cela a conduit logiquement à une augmentation de la teneur en C et N org ainsi que de l'ensemble des indicateurs dans la couche superficielle (0-10 cm) des traitements sans labour par rapport à la couche labourée du traitement labour. Mais on constate également que certains indicateurs exprimés en % du C ou du N organique total sont modifiés.

Enfin, 2 niveaux d'intensification d'une monoculture de maïs irrigué pendant 8 ans sur l'essai de St Exupéry ont modifié la composition granulométrique de la matière organique et la minéralisation de l'azote organique alors qu'ils n'ont pas modifié la teneur en C et N organiques totaux (Figure 4).

VI. Conclusion et perspectives

Les indicateurs de qualité biologique des sols retenus se sont montrés pertinents pour discriminer les effets des pratiques culturales. Le traitement des données se poursuit, avec notamment la confrontation avec d'autres variables mesurées au champ comme les rendements ou les fournitures en azote mesurées *in situ*.

En regroupant les essais étudiés, l'effet du contexte pédoclimatique semble prépondérant sur les historiques culturaux. Dans l'optique de construction de référentiels d'interprétation, il sera donc nécessaire d'acquérir des références par zones pédoclimatiques. La démarche de référencement sera différente de celles des indicateurs de fertilité utilisés actuellement. En effet, contrairement au phosphore ou à la potasse, des courbes de réponse du rendement à ces indicateurs biologiques ne pourront pas être construites. Il faudra donc acquérir des données par contexte agropédoclimatique afin de constituer une valeur moyenne et une plage de variation. L'analyse faite par l'agriculteur pourra alors être comparée aux données de référence du contexte où il se situe.

Un tel investissement nécessite une sélection rigoureuse des indicateurs les plus pertinents. Les acquis méthodologiques permettent déjà de mieux maîtriser le prélèvement. Des progrès sont encore nécessaires sur les indicateurs en développement afin de les rendre plus accessibles ou mieux interprétables. Ainsi l'activité enzymatique FDA hydrolase est globalement bien corrélée à la biomasse microbienne (Figure 7) mais sa réponse au type de sol d'une part et aux pratiques agronomiques d'autre part reste à préciser. De même, le test des aptitudes métaboliques ne débouchera probablement pas sur du conseil mais pourrait être un bon outil pour communiquer sur la biodiversité fonctionnelle de la microflore du sol.

Il pourra également être pertinent d'utiliser ce type d'indicateurs sur d'autres dispositifs expérimentaux agronomiques, existants ou à mettre en place : cela permettrait d'étudier la vitesse de réponse des indicateurs aux changements de pratiques. Il faudra également continuer de valoriser les autres travaux en cours. L'ADEME a ainsi démarré en 2004 un programme intitulé « Bio-Indicateurs » qui a pour objectif de proposer l'utilisation d'indicateurs basés sur la biologie des sols, en vue

d'évaluation de risques et de surveillance (BISPO *et al*, 2009). Les résultats obtenus sur plus d'une centaine de sites en Bretagne ont permis de valider les indicateurs, telle la biomasse microbienne, capables de discriminer les modes d'usage des sols et les pratiques culturales (CLUZEAU *et al.*, 2011). La seconde phase de ce programme, qui a débutée en 2010, porte en partie sur des situations agronomiques et met en œuvre des indicateurs sélectionnés lors de la première phase.

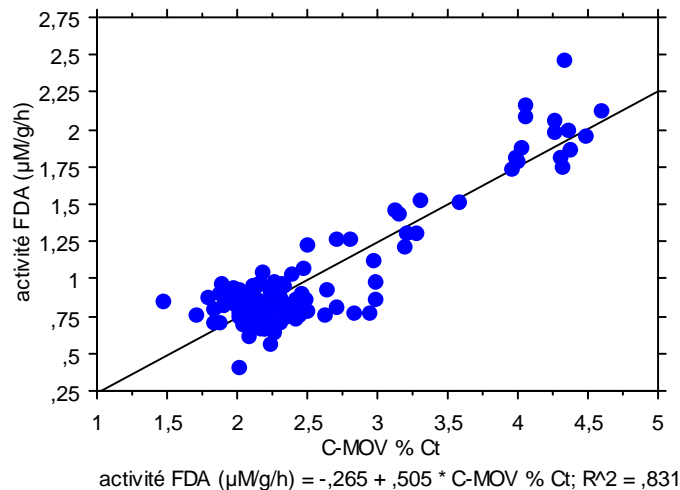


Figure 7 : Relation entre la biomasse microbienne en % du C org (C-MOV %) et l'activité FDA hydrolase mesurés en 2010 sur l'ensemble des essais de longue durée d'ARVALIS

Tous les indicateurs de qualité biologique de sols ne peuvent pas devenir indicateurs de diagnostic. Ces indicateurs ne sont pas pourtant dénués d'intérêt : ce sont des outils de compréhension et de communication. De plus, même des indicateurs de diagnostic ne pourront pas tout dire ou tout expliquer. Ainsi les indicateurs de qualité biologique des sols ne déboucheront probablement pas sur des conseils de fertilisation. Il ne faut donc pas en attendre les mêmes valorisations que les analyses de terre classiques. Ils peuvent par contre être des outils de dialogue sur les choix de pratiques culturales d'un agriculteur (travail du sol, fertilisation organique, couverts végétaux, etc).

Références bibliographiques

- AFNOR, Septembre 2011. NF EN ISO 14240-2 : Qualité du sol - Détermination de la biomasse microbienne du sol - Partie 2 : méthode par fumigation-extraction
- AFNOR, Septembre 2007. NF X31-516 : Qualité du sol - Fractionnement granulo-densimétrique des matières organiques particulaires du sol dans l'eau
- AFNOR, Décembre 2009. XP U44-163 : Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote
- BERTHELIN J., 2007. Les micro-organismes, clé des recyclages biogéochimiques. In : PEDRO G., *Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux, Académie des sciences, Les Ulis*, 267-296.
- BISPO A., GRAND C. et GALSOMIES L., 2009. Le programme ADEME « Bioindicateurs de qualité des sols » : vers le développement et la validation d'indicateurs biologiques pour la protection des sols, *Etude et Gestion des sols*, 16 (3/4), 145-158.
- BOULOC A., 2010, Elaboration d'un référentiel d'interprétation pour des indicateurs de la qualité biologique des sols agricoles, Mémoire d'ingénieur, *Ecole d'Ingénieurs de Purpan*
- BOUTHIER A., DAMAY N., DENOROY P., DUPARQUE A., HOUOT S. et MARY B. 2011. Projet AMG : développement d'outils d'aide à la décision pour gérer le stock de carbone organique des sols cultivés. *Echo-MO*, 90, 4-8.

- CHAUSSOD R., 1996, La qualité biologique des sols : évaluation et implications, *Etude et gestion des sols*, 3, 261-277.
- CHAUSSOD R. et NOUAIM R. 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés : des indicateurs d'intérêt agronomique. *Perspectives Agricoles*, 272, 46-48.
- CLUZEAU D. ; HALLAIRE V. ; BODET, J.M., 2001, Le rôle des lombriciens sur le fonctionnement des sols. Impact des pratiques agricoles, *Colloque SIMA, Paris, 21 Février 2001*.
- CLUZEAU D., GUERNION M., CHAUSSOD R., MARTIN-LAURENT F., VILLENAVE C., CORTET J., RUIZ-CAMACHO N., PERNIN C., MATEILLE T., PHILIPPOT L., BELLIDO A., ROUGE L., ARROUAYS D., BISPO A. and PERES G. 2011. Integration of biodiversity in soils quality monitoring : baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology*, sous presse.
- GREEN V.S., STOTT D.E. and DIACK M. 2006. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: optimization for soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 693-701.
- LEMAITRE A., CHAUSSOD R., TAVANT Y. and BRUCKERT S. 1995a, An attempt to determine a pool of labile organic matter associated with the soil microbial biomass. *European Journal of Soil Biology*, 31, 121-125.
- LEMAITRE A, TAVANT Y, CHAUSSOD R, et ANDREUX F, 1995b, Characterization of microbial components and metabolites isolated from a humic calcic soil. *European Journal of Soil Biology* 31, 127-133.
- SANCHEZ MONEDERO M.A., MONDINI C., CAYUELA M.L., ROIG A., CONTIN M., DE NOBILI M. (2008) Fluorescein diacetate hydrolysis, respiration and microbial biomass in freshly amended soils, *Biology and Fertility of Soils*, 44, 885-890.
- SCHÜRER J., ROSSWALL T., 1982, Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter, *Applied and Environmental Microbiology*, 43, 1256-1261.