

BIODIVERSITE MICROBIENNE ET QUALITE DU SOL : DES INDICATEURS BIOLOGIQUES A PORTEE AGRONOMIQUE.

Rachida NOUAÏM et Rémi CHAUSSOD
SEMSE, 2 chemin du Lavoir, 21310 Viéville - contact@semse.fr

Introduction :

La maîtrise de la « qualité des sols » est un enjeu important pour l'agriculture et se situe au carrefour des préoccupations du COMIFER et du GEMAS. Cette notion de « qualité des sols » recouvre les propriétés physiques, chimiques et biologiques dont les effets propres et les interactions se traduisent par un fonctionnement plus ou moins efficace en termes de production, d'impact sur l'environnement et de durabilité des systèmes de culture. Actuellement, des analyses physico-chimiques standardisées sont proposées en routine par de nombreux laboratoires d'analyse de terres. Toutefois, ces analyses ne renseignent que sur les aspects « chimiques » et, en ce qui concerne la matière organique par exemple, elles ne permettent de déceler des évolutions que sur le long terme et que si elles sont importantes. Or, nous avons besoin d'outils plus sensibles et plus directement en lien avec le fonctionnement biologique des sols, pour mettre en évidence des évolutions liées aux changements de pratiques culturales par exemple. C'est pourquoi la demande actuelle porte de plus en plus sur les aspects biologiques de la qualité des sols. Dans ce cadre, depuis sa création en 2000, le SEMSE (Services et Etudes en Microbiologie des sols et de l'Environnement) travaille à la mise au point d'indicateurs microbiologiques de la qualité des sols. Ces travaux sont menés avec des partenaires appartenant à des Instituts Techniques (Arvalis, IFV), des Chambres d'Agriculture, des Organisations professionnelles (CIVC, etc.), des structures de recherche (INRA, Université). L'objectif est d'adapter des méthodes issues de la recherche aux préoccupations de la profession agricole, que ce soit en grandes cultures (Chaussod & Nouaïm, 2001 ; Valé *et al.*, 2011) ou en viticulture (Chaussod *et al.*, 2000 ; Chaussod et Nouaïm, 2011 ; Nouaïm et Chaussod 2012).

1) Quel indicateur, pour quelle fonction ?

La « qualité biologique des sols » fait référence à l'abondance, à l'activité et à la diversité des êtres vivants qui peuplent le sol (Chaussod, 1996). Comme il est matériellement impossible de tout mesurer, les investigations se limitent généralement à l'étude de sous-ensembles choisis parmi la faune, notamment lombriciens ou nématodes, ou à la microflore. Cette dernière fait l'objet d'une attention particulière car elle représente en masse la plus grande part des organismes vivants du sol et elle constitue un acteur majeur des cycles biogéochimiques. En raison de l'extraordinaire complexité biologique du sol, la démarche naturelle est de s'appuyer sur des « bio-indicateurs », qui sont des paramètres accessibles à l'analyse et utilisables pour juger de l'état biologique des sols comme pour apprécier leur évolution sous l'effet de facteurs anthropiques (Cluzeau *et al.*, 2012 ; Ponge *et al.*, 2013). Pour être « opérationnel » dans le cadre agronomique qui nous intéresse ici, un indicateur biologique doit répondre à au moins trois critères (Chaussod, 2002) : être pertinent par rapport à une composante identifiée de la qualité biologique des sols (fertilité, état sanitaire, résilience, externalités), être mesurable de façon fiable, et enfin être interprétable, ce qui implique d'établir des référentiels d'interprétation tenant compte des facteurs pédologiques et des facteurs anthropiques (systèmes de culture, pratiques culturales...).

Deux approches sont possibles : considérer les microorganismes du sol comme un ensemble à appréhender dans sa globalité, ou étudier des groupes plus restreints, choisis en

fonction de leur intérêt agronomique. Bien entendu le choix des indicateurs à mesurer sera fonction des questions posées et des objectifs. Nous ne détaillerons pas ici tous les indicateurs utilisables ; certains sont présentés par d'autres intervenants (voir notamment les communications de A. Bouthier et T. Morvan).

En ce qui concerne les méthodes globales, nous avons développé ou participé à l'élaboration d'outils méthodologiques qui sont maintenant utilisés en routine (Valé *et al.*, 2011). C'est le cas notamment de la mesure de Biomasse Microbienne, aujourd'hui normalisée, et dont on a montré qu'elle est en relation avec la fourniture d'azote (Chaussod & Houot, 1993 ; Loiseau *et al.*, 1994). Le programme « Bio-Indicateurs » coordonné par l'ADEME a validé la mesure de biomasse microbienne par Fumigation-Extraction comme particulièrement performante en termes de reproductibilité, de précision et d'aptitude à discriminer des situations différentes au plan pédologique, d'usage des sols et de pratiques culturales (Cluzeau *et al.*, 2012). De même, des méthodes globales d'activité portant sur la minéralisation du carbone et de l'azote sont désormais normalisées tandis que d'autres mesures (comme l'azote minéralisable en anaérobiose ou l'activité FDA-hydrolase) ne sont pas normalisées mais sont opérationnelles et déjà utilisées dans la pratique.

En ce qui concerne la diversité microbienne du sol, la situation est toute autre. Classiquement, la notion de biodiversité fait référence à un nombre d'espèces au sein d'un groupe donné d'être vivants, ainsi le cas échéant qu'à un nombre d'individus par espèce. Pour ce qui concerne la diversité microbienne du sol, la situation est très différente et infiniment plus complexe. Mais la notion de « biodiversité », qui n'est pourtant que l'une des composantes de la qualité biologique des sols, a été si fortement médiatisée et popularisée à la suite du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro (1998) que ce terme a fini par recouvrir, dans l'esprit de beaucoup de gens, l'ensemble de la qualité des sols.

2) La diversité microbienne comme composante de la qualité des sols ?

L'Institut Français pour la Biodiversité (qui gère l'Observatoire National de la Biodiversité, créé en 2011 suite au Grenelle de l'Environnement), considère que les notions de protection, de conservation et de restauration de la biodiversité font elles-mêmes l'objet d'interrogations. Il importe donc de bien cerner l'objet d'étude, c'est-à-dire de définir ce que l'on entend par biodiversité et comment aborder concrètement cette notion : quoi mesurer et pour quoi faire ? Comme évoqué précédemment, on peut choisir de s'intéresser à la microflore du sol dans son ensemble (et c'est ce point qui sera développé ici), ou bien de se limiter à des populations particulières, notamment celles présentant un intérêt agronomique direct et/ou utilisables en tant que bio-indicateur.

2.1) Le concept de biodiversité et les approches pour l'estimer

Pour la microflore des sols, le concept de biodiversité recouvre en fait des aspects très différents : diversité taxonomique, diversité génétique, diversité écologique, diversité fonctionnelle...

La diversité taxonomique fait référence au nombre d'unités taxonomiques présentes et à leurs proportions relatives. Son évaluation se heurte à de nombreuses difficultés théoriques et pratiques. La définition même d'espèces pose problème. Les spécialistes considèrent qu'une espèce doit être définie par un ensemble de caractéristiques génotypiques et phénotypiques, mais cela n'est possible que pour les souches isolées. Or de très nombreux micro-organismes du sol sont « non cultivables ». On procède donc souvent à une caractérisation assez simple de l'ADN microbien extrait directement du sol. Diverses techniques d'empreintes moléculaires (DGGE, T-RFLP, RISA, etc.) donnent ainsi une idée du polymorphisme de l'ADN extrait. Des techniques plus élaborées (séquençage) peuvent être mises en œuvre pour s'approcher d'une caractérisation taxonomique, mais deux séquences déclarées comme appartenant à une même unité taxonomique peuvent en réalité correspondre à des organismes différant totalement sur des critères importants au plan

fonctionnel. Au total, cette approche reste lourde et coûteuse, et de nombreuses limitations théoriques et pratiques en amont subsistent (Martin-Laurent *et al.*, 2001). On rencontre d'ailleurs des difficultés identiques lorsqu'on s'intéresse aux gènes de fonction : par exemple, Martin-Laurent *et al.* (2004) ont montré qu'il n'y a pas de relation entre le nombre de copies d'un gène de dégradation de l'atrazine et l'activité correspondante.

La diversité génétique correspond au polymorphisme d'un ou plusieurs gènes chez une même espèce ou au sein d'une population (qui peut être l'ensemble de la microflore du sol). L'étude du polymorphisme de gènes de fonction en lien avec un « service écosystémique » est intéressante car elle permet de juger des capacités évolutives, permettant en particulier d'assurer la permanence de la fonction dans un environnement changeant. On rejoint ici la notion de redondance fonctionnelle et son rôle dans la résilience et la stabilité des écosystèmes.

La diversité écologique correspond à la diversité des habitats microbiens, à toutes les échelles spatiales (de l'agrégat au continent). La diversité des micro-organismes du sol serait très largement la conséquence de la diversité des habitats correspondants, que ce soit au niveau de la protection physique et de la porosité, des conditions de l'environnement pédoclimatique (humidité, température, aération, pH, etc.) ou des ressources trophiques.

La diversité fonctionnelle fait référence aux aptitudes métaboliques de la microflore dans son ensemble, indépendamment de sa composition taxonomique. En effet, comme le soulignait Thomas Brock : « *In terms of the overall function of the ecosystem, it is not the kind of organisms which are most relevant but their activities* ». Dans la mesure où c'est le bon fonctionnement de l'écosystème sol qui nous préoccupe, l'approche la plus pertinente est effectivement de s'intéresser à la diversité fonctionnelle à travers un test pouvant être mis en oeuvre en routine et pour un coût acceptable, compatible avec les attentes de la profession agricole. Cette démarche pragmatique nous a semblé être la voie la plus efficace pour progresser vers une approche opérationnelle dans un contexte agronomique, même si la réalité des choses est plus complexe.

Très souvent, la notion très globale de « diversité » est utilisée en fait pour décrire la complexité et la variabilité à différents niveaux d'organisation biologique, depuis la diversité génétique infra-spécifique jusqu'aux associations microbiennes et à la diversité écologique, ce qui inclut la variabilité de la structure des communautés et la complexité de leurs interactions, ainsi bien sûr que la diversité fonctionnelle. L'influence de la diversité taxonomique sur les fonctions du sol n'a jamais pu être mise clairement en évidence, hormis quelques expérimentations de laboratoire en conditions très artificielles ; en revanche, la redondance fonctionnelle est bien documentée (Souza *et al.*, 2015).

2.2) Développement d'un test opérationnel

Nous avons donc développé un test de routine assez simple, basé sur les aptitudes métaboliques de la microflore et s'appuyant sur des plaques Biolog[®]. Dans son principe, cette approche consiste à établir un profil physiologique au niveau de la communauté microbienne dans son ensemble (CLPP : *Community-Level Physiological Profile*), comme cela était pratiqué initialement pour l'identification par phénotypage de souches microbiennes isolées. Garland & Mills (1991) ont été les premiers à utiliser des micro-plaques de 96 puits, chacun contenant un substrat carboné différent, pour évaluer la diversité fonctionnelle de communautés microbiennes du sol. Cette méthode a fait l'objet d'évaluation et d'améliorations par de très nombreux chercheurs, tant en ce qui concerne le protocole expérimental que le traitement des résultats (Zak *et al.*, 1994 ; Haack *et al.*, 1995 ; Calbrix *et al.*, 2005). Ces bases solides font que cette méthode est de plus en plus utilisée pour des applications concrètes, que ce soit pour comparer des pratiques agronomiques (Govaerts *et al.*, 2007 ; Van Capelle *et al.*, 2012) ou évaluer les effets de polluants. Enfin, cette approche relativement simple s'avère aussi discriminante que des approches plus lourdes, plus coûteuses et pas nécessairement plus simples à interpréter (Widmer *et al.*, 2001).

Le test BioDiF (pour **Bio-Diversité Fonctionnelle**) développé par le SEMSE fait appel à des plaques Biolog® EcoPlates™. Ces plaques sont constituées de 3 répétitions de 32 puits, correspondant à 31 substrats carbonés différents et une référence (eau). Les plaques sont inoculées par une suspension de sol obtenue dans des conditions standardisées, puis incubées à température constante, la densité optique des puits étant enregistrée toutes les 24h. Les résultats des mesures sont restitués sous trois formes complémentaires :

Tout d'abord, sous forme d'une « activité métabolique moyenne » (AWCD) correspondant à la densité optique moyenne calculée sur l'ensemble des puits.

Ensuite, les résultats sont présentés sous forme « radar » illustrant les activités métaboliques par substrat ou par famille biochimique de substrat.

Enfin, les résultats sont agrégés en un Indice de Biodiversité Fonctionnelle (IBF) calculé à l'aide d'un algorithme spécifique. Ce dernier a été conçu à partir des indices classiques de diversité, en tenant compte des spécificités de la méthodologie et délivrant un résultat aisément compréhensible par les utilisateurs (en l'occurrence sur une échelle de 0 à 5).

3) Quelques exemples concrets

Les exemples présentés ci-dessous sont donnés uniquement à titre d'illustration de la méthodologie « BioDiF » ; les interprétations agronomiques s'appuient également sur d'autres mesures qui ne sont pas présentées ici.

3.1) Exemples en grandes cultures

3.1.a) Expérimentation « fermes de Boigneville » (ARVALIS).

Cette expérimentation est présentée en détails par Alain Bouthier dans sa communication à ce colloque. Le tableau 1 présente les résultats du test BioDiF (activité métabolique moyenne AWCD et indice de diversité IBF) pour trois parcelles échantillonnées sur 0-20 cm : P43 (raisonné), P44 (intégré) et P233 (biologique). Les deux premières modalités sont différenciées depuis 25 ans, la troisième depuis 8 ans.

Tableau 1 : valeurs caractéristiques du test BioDiF pour 3 modalités labourées (43 R = raisonné ; 44 I = intégré ; 233 Bio = biologique)

Modalité	AWCD	IBF
43 R 0-20	0,72	1,9
44 I 0-20	1,03	3,5
233 Bio 0-20	1,17	2,8

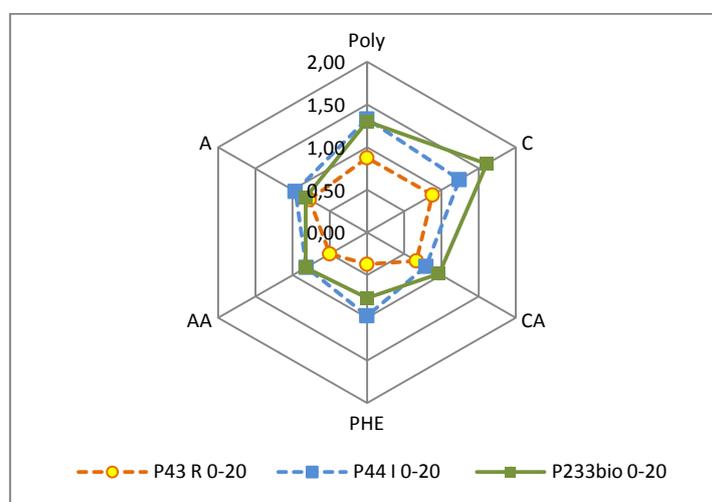


Figure 1 : Représentation des activités métaboliques par famille de substrats

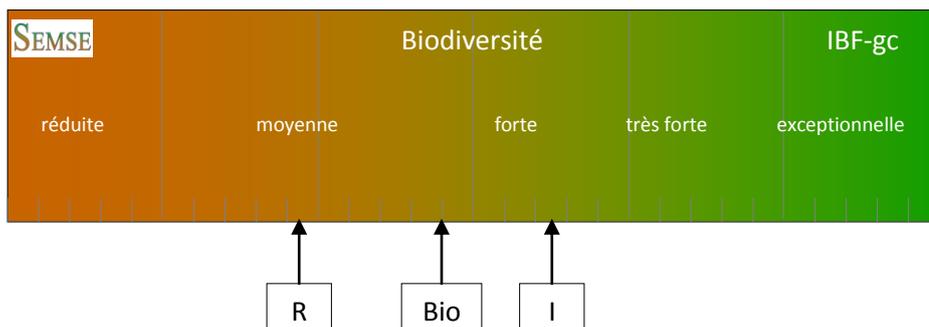


Figure 2 : représentation graphique de l'indice de diversité fonctionnelle pour les 3 modalités avec labour

Les mêmes mesures ont été effectuées sur deux modalités non labourées : P42 monoculture de blé depuis 25 ans et P36 en semis sous couvert vivant (SCV) depuis 5 ans. En l'absence de labour, on a ici distingué l'horizon superficiel 0-10 cm de l'horizon sous-jacent 10-20 cm. Les activités métaboliques s'avèrent plus élevées en surface qu'en profondeur : la figure 3 illustre les activités métaboliques moyennes, la figure 4 représente les activités par familles de substrats (C= carbohydrates ; CA = acides carboxyliques ; PHE = composés phénoliques ; AA = acides aminés ; A = amines ; Poly = polymères).

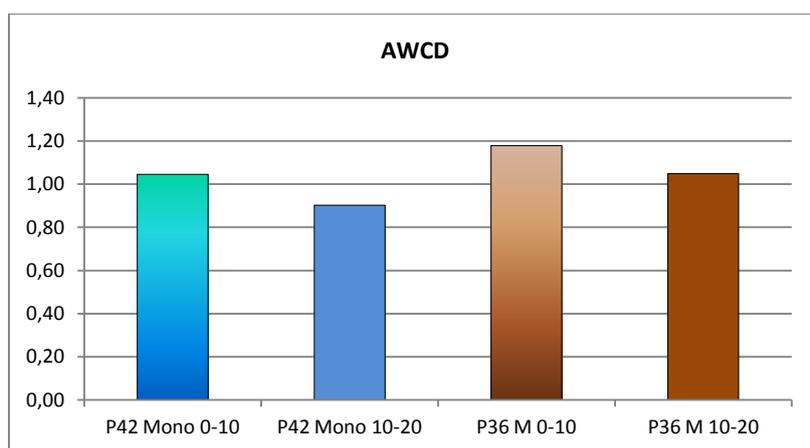


Figure 3 : différenciation des horizons dans deux parcelles non labourées

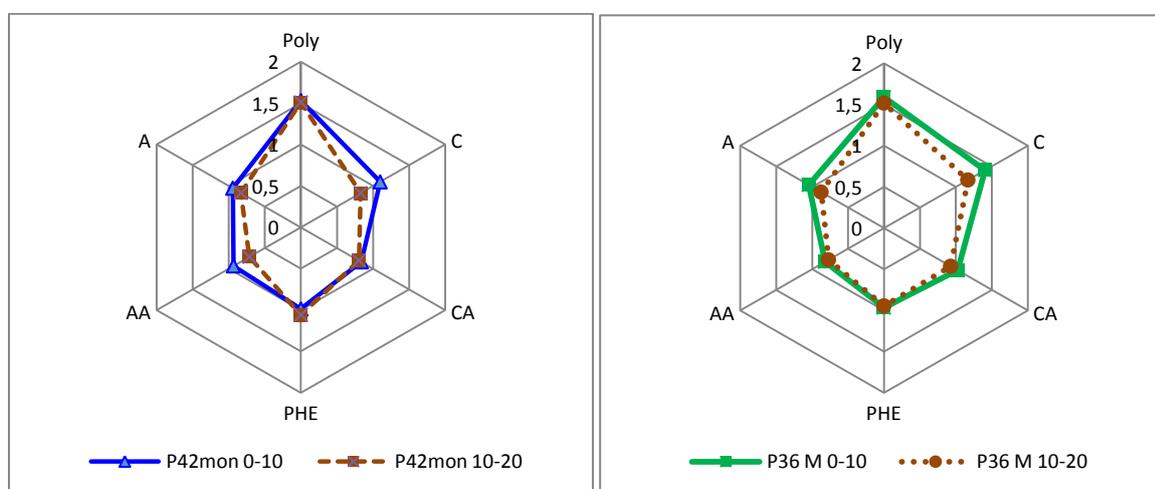


Figure 4 : Représentation des activités métaboliques par famille de substrats

3.1.b) Expérimentation « Réseau SCV » (ARVALIS).

Parmi les parcelles de ce réseau, l'exemple présenté dans le tableau 2 montre les résultats obtenus pour deux essais proches l'un de l'autre, l'un ancien (mis en place il y a 10 ans), l'autre beaucoup plus récent (prélevé en 2^{ème} année). On constate que la différenciation entre les deux horizons s'accroît avec le temps. Les autres paramètres biologiques mesurés, que ce soit la biomasse microbienne (non présentée ici) ou l'activité FDA-hydrolase (dernière colonne du tableau 2), vont dans le même sens.

Tableau 2 : quelques paramètres biologiques pour deux essais voisins du réseau SCV

	Origine échantillon de sol	AWCD	IBF	FDA-hydrolase (µM/g/h)
Essai ancien	SD 10 ans 0-10 cm	1,35	3,3	4,18
	SD 10 ans 10-20 cm	0,70	2,7	3,12
Essai récent	SD 1-2 ans 0-10 cm	1,10	2,7	3,11
	SD 1-2 ans 10-20 cm	0,94	1,6	2,39

3.2) Exemples en viticulture

3.2.a) Expérimentation « Comparaison de Modes de Production » (Vinipôle Sud Bourgogne).

Cette expérimentation, mise en place en 2005 par la Chambre d'Agriculture de Saône & Loire, compare trois modes de production : Viticulture Durable (selon préconisations de la Chambre d'Agriculture), Viticulture Biologique (selon cahier des charges de l'AB), Viticulture Ecophyto (avec comme objectif de réduire fortement l'usage de produits phyto-sanitaires). Il y a 3 répétitions de terrain pour chaque modalité. Dans cet essai, les modalités Bio et Ecophyto sont désherbées mécaniquement, alors que la modalité Durable est enherbée (avec désherbage chimique sous le rang).

Les caractéristiques biologiques d'abondance (Biomasse microbienne), d'activité (FDA-hydrolase) et de diversité (test BioDiF avec ses sorties AWCD et IBF) ont été mesurées sur les 9 échantillons de sol, correspondant aux trois blocs des modalités Durable (D), Biologique (B) et Ecophyto (E). La figure 5 ci-dessous illustre les valeurs moyennes de l'IBF. La figure 6 page suivante montre que, sur la base des paramètres biologiques, les échantillons de sol prélevés dans les 3 blocs se regroupent bien par modalité. Ici, le mode d'entretien des sols a plus d'importance que la nature ou l'intensité des traitements phyto-sanitaires. La présence d'herbe se traduit par des paramètres biologiques plus favorables, en particulier pour l'Indice de Biodiversité Fonctionnelle.

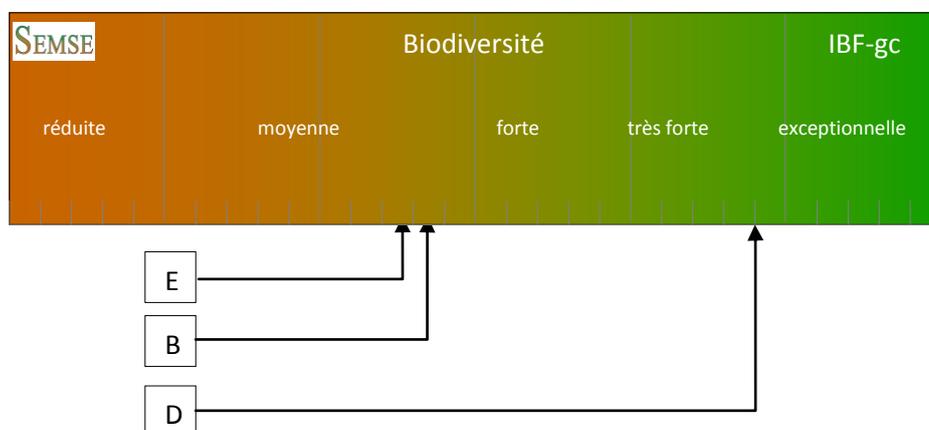


Figure 5 : Représentation de l'Indice de Biodiversité Fonctionnelle pour les 3 modalités de l'essai de Davayé

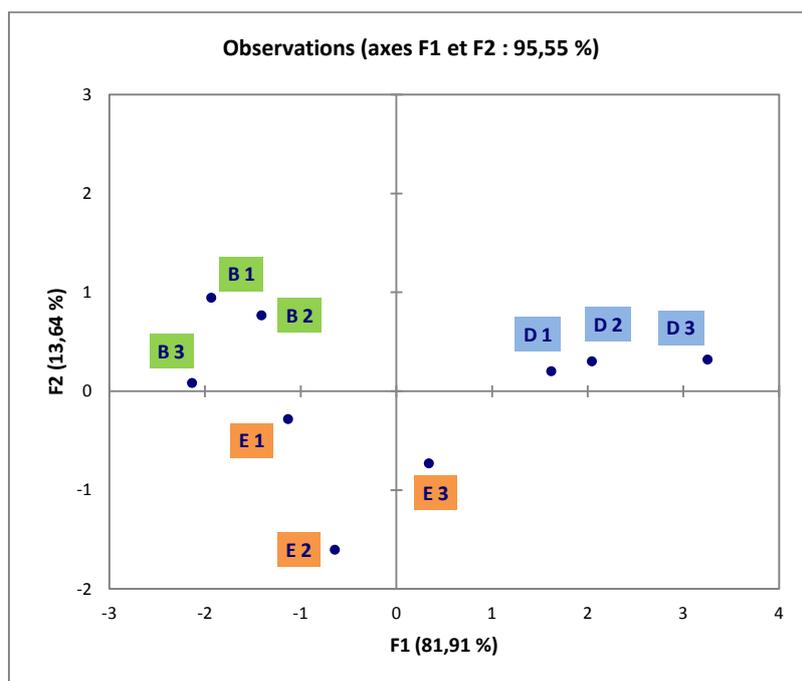


Figure 6 : Analyse multivariée sur l'ensemble des paramètres biologiques

3.2.b) Expérimentation « Phosphore » à Essoyes (CIVC).

Une expérimentation comparant trois modalités de fertilisation phosphatée (0, 60, 120 unités P_2O_5 /ha/an) a été mise en place par le CIVC à Essoyes (Aube) en 1994, sur défriche de forêt, sans antécédent viticole ni historique de fertilisation. Des prélèvements de sol ont été effectués 18 ans après le début de l'essai et divers paramètres physico-chimiques et biologiques ont été mesurés sur tout le profil de sol (H1 = 0-20 cm ; H2 = 20-50 cm) ; H3 = 50-70 cm, niveau du calcaire dur). Les principaux résultats sont rapportés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Résultats des principaux paramètres mesurés dans le bloc 1 de l'expérimentation d'Essoyes

Modalité	P_2O_5 Olsen mg/kg	Biomasse microbienne		BioDiF		Paramètres de mycorhization	
		mgC/kg	%Ct	AWCD	IBF	Taux	Intensité
0P H1	24	781	2,76	1,10	2,9	0,89	1,78
0P H2	< 10	356	2,15	1,24	2,9	0,69	1,13
0P H3	15	55	0,71	0,43	0,9	0,38	0,44
60P H1	70	635	2,83	1,23	2,3	0,40	0,63
60P H2	20	319	1,85	0,89	1,6	0,78	1,37
60P H3	10	26	0,37	0,36	0,7	0,39	0,4
120P H1	208	903	3,07	1,12	1,6	0,56	0,87
120P H2	< 10	491	3,46	1,51	3,4	0,52	0,87
120P H3	< 10	20	0,27	0,22	0,5	0,52	0,86

La biomasse microbienne est particulièrement élevée dans ce sol argilo-calcaire sans antériorité viticole importante (très peu de cuivre). Le test BioDiF met en évidence des activités métaboliques moyennes élevées jusqu'à 50 cm, indépendamment du niveau de fertilisation phosphatée. L'indice de biodiversité fonctionnelle peut être qualifié de

globalement correct. Dans l'horizon 0-20 cm, il baisse cependant avec l'accumulation de phosphore extractible, passant de 2,9 pour la modalité 0P à 2,6 pour la modalité 60P et à 1,6 pour la modalité 120P.

D'autres paramètres biologiques ont été mesurés dans cet essai (Nouaïm *et al.*, 2015), dont bien sûr l'état de mycorhization des racines de vigne et les spores de champignons endomycorhiziens. La figure 7 illustre la diversité morphologique des spores caractéristiques de ces champignons. La modalité non fertilisée se distingue par une grande abondance de spores, mais les apports d'engrais phosphatés ne s'accompagnent pas d'un effondrement des populations de champignons endomycorhiziens, ni en nombre, ni en diversité.

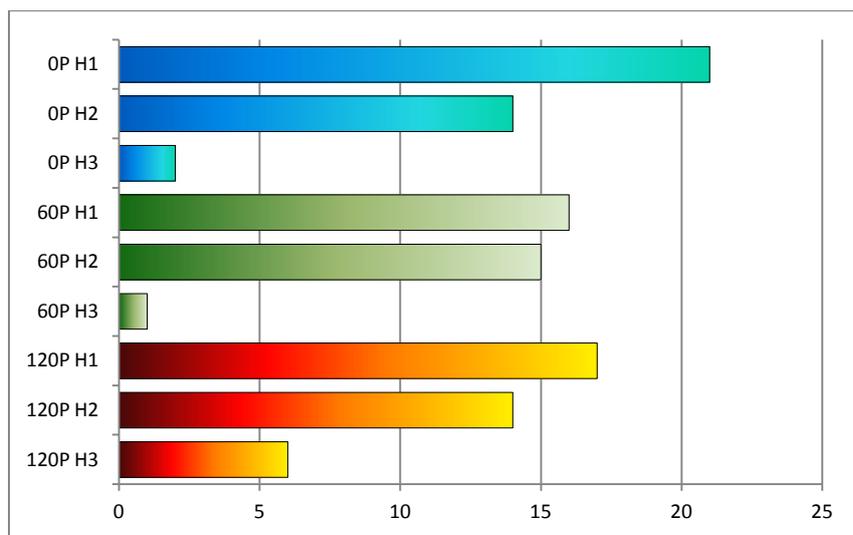


Figure 6 : Diversité des champignons endomycorhiziens = nombre de formes différentes de spores

Conclusion

Le test BioDiF est aujourd'hui un test opérationnel qui peut utilement compléter les mesures d'abondance et d'activité déjà disponibles pour comparer différentes pratiques agricoles, que ce soit en grande culture, en viticulture, ou pour d'autres productions. L'approche BioDiF s'avère à la fois pertinente, fiable et financièrement accessible pour apporter des réponses aux questions légitimes de la profession agricole en matière de « biodiversité » microbienne dans les sols.

D'une façon plus générale, une bonne interprétation de l'état du sol doit reposer sur la connaissance des paramètres physico-chimiques de base de l'analyse de terre, complétée de mesures biologiques appropriées, à choisir en fonction des questions posées. Des paramètres quantitatifs (biomasse microbienne, etc.) sont déjà utilisables pour répondre aux questions touchant l'évolution des stocks organiques ou la fourniture d'azote par le sol. Une appréciation simple de la diversité fonctionnelle, à travers le test BioDiF, permet d'apporter en plus un éclairage intéressant pour ce qui concerne les conséquences de changement de pratiques (modes de production, travail du sol, etc.). Toutefois, il est important de souligner ici l'importance d'une interprétation correcte des résultats, ce qui n'est pas forcément immédiat. L'interprétation repose essentiellement sur des référentiels spécifiques, déclinés par contextes pédologiques et agronomiques, que le SEMSE développe avec ses partenaires en se basant à la fois sur des expérimentations bien gérées et sur des parcelles de type « enquête » balayant des situations contrastées.

Enfin, en ce qui concerne la biodiversité, on retiendra que le problème n'est pas tant de la décrire que de la comprendre. Le fonctionnement biologique du sol est caractérisé par une extraordinaire complexité. C'est cette complexité qui est appelée « biodiversité » ; or ce terme est souvent compris comme faisant implicitement référence à la diversité taxonomique, alors que la complexité-diversité va bien au-delà. Elle n'est pas un attribut mais constitue une part essentielle du fonctionnement de l'écosystème sol. Plus le milieu est hétérogène et évolutif, plus la diversité microbienne augmente. Réciproquement, un milieu stable et peu perturbé sera caractérisé par une plus faible biodiversité microbienne. En tous cas, l'écologie microbienne du sol n'a pas grand-chose à voir avec l'écologie de la forêt amazonienne par exemple et nous sommes assez loin du « dogme » selon lequel la biodiversité s'érode en permanence en raison des activités humaines.

Remerciements

Que soient remerciées ici toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à ce travail, en particulier : A. Bouthier, R. Trochard, J. Labreuche, C Toqué et A.L. Toupet (ARVALIS) ; M. Valé (AUREA Agrosociences) ; D. Sauvage et F. Bidaut (Vinipôle Sud Bourgogne) ; B. Duron, O. Garcia et A. Descôtes (CIVC).

Références citées

- Bouthier A., Trochard R., Valé M., Chaussod R., Nouaïm R. .2015. Valoriser les indicateurs microbiologiques en grandes cultures et en polyculture-élevage. 12^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER- GEMAS, Lyon 18-19/11/2015.
- Calbrix R., Laval K., Barray S. 2005. Analysis of the potential functional diversity of the bacterial community in soil: a reproducible procedure using sole-carbon-source utilization profiles. *European Journal of Soil Biology*, **41**, pp 11-20.
- Chaussod R., Houot S. 1993. La biomasse microbienne des sols : perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols. *In* : Matières organiques et agricultures, Colloque GEMAS-COMIFER (Blois), pp 17-26.
- Chaussod R. 1996. La qualité biologique des sols. Evaluation et implications. *Etude et Gestion des Sols*, **3**, pp 261-277.
- Chaussod R., Breuil M.C., Nouaïm R., Lévêque J., Andreux F. 2000. Des mesures microbiologiques pour évaluer la fertilité des sols viticoles. *Revue des Oenologues*, **95**, pp 19-22.
- Chaussod R., Nouaïm R. 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés : des indicateurs d'intérêt agronomique. *Perspectives Agricoles*, **272**, pp 46-48.
- Chaussod R. 2002. La qualité biologique des sols : des concepts aux applications. *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, **88**, pp 61-68.
- Chaussod R. et Nouaïm R. 2011. La microbiologie des sols a-t-elle une utilité ? *Revue des Oenologues*, **141**, pp 28-29.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., Philoppot 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**, pp 63-72.
- Garland J.L. and Mills A.L. 1991. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied and Environmental Microbiology*, **57**, pp 2351-2359.
- Govaerts B., Mezzalama M., Unno Y., Sayre K.D., Luna-Guido M., Vanherrick K., Dendooven L., Deckers J. 2007. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity. *Applied Soil Ecology*, **37**, pp 18-30.

- Haack S.K., Garchow H., Klug M.J., Forney L.J. 1995. Analysis of factors affecting the accuracy, reproductibility, and interpretation of microbial community carbon source utilization patterns. *Applied Environmental Microbiology*, **61**, pp 1458-1468.
- Loiseau P., Chaussod R. et Delpy R. 1994. Soil microbial biomass and in situ nitrogen mineralization after 20 years of different nitrogen fertilization and forage cropping systems. *European Journal of Agronomy*, **3**, pp 327-332.
- Martin-Laurent F., Philippot L., Hallet S., Chaussod R., Germon J.C., Soulas G., Catroux G. 2001. DNA extraction from soils : old bias for new microbial diversity analysis methods. *Applied and Environmental Microbiology*, **67**, pp 2354-2359.
- Martin-Laurent F., Cornet L., Ranjard L., Lopez-Gutierrez J.C., Philippot L., Schwartz C., Chaussod R., Catroux G., Soulas G. 2004. Estimation of atrazine-degrading genetic potential and activity in three French agricultural soils. *FEMS Microbiology Ecology*, **48**, pp 425-435.
- Nouaïm R. et Chaussod R. 2012. La microbiologie des sols a-telle une utilité ? Partie 2/2 : Champignons endomycorhiziens et levures, deux populations d'intérêt agro-viticole. *Revue des Oenologues*, **142**, pp 20-22.
- Nouaïm R., Chaussod R., Duron B., Garcia O. 2015. Fertilisation phosphate de la vigne en Champagne. On peut compter sur les mycorhizes ! *Le Vigneron Champenois*, 02/15, pp 42-56.
- Ponge J.F., Pérès G., Guernion M., Ruiz-Camacho N., Cortet J., Pernin C., Villenave C., Chaussod R., Martin-Laurent F., Bispo A., Cluzeau D. 2013. The impact of agricultural practices on soil biota: A regional study. *Soil Biology and Biochemistry*, **67**, pp 271-284.
- Souza R.C., Hungria M., Cantao M.E., Ribeiro Vasconcelos A.T., Nogueira M.A., Vicente V.A. 2015. Metagenomic analysis reveals microbial functional redundancies and specificities in a soil under different tillage and crop-management regimes. *Applied Soil Ecology*, **86**, pp 106-112.
- Valé M., Bouthier A., Trochard R., Chaussod R., Nouaïm R. 2011. Pertinence de nouveaux indicateurs pour évaluer l'impact des pratiques culturales sur le fonctionnement biologique des sols. 10èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER-GEMAS, Reims, 23-24/11/2011.
- Van Capelle C., Schrader S., Brunotte J. 2012. Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data. *European Journal of Soil Biology*, **50**, pp 165-181.
- Widmer F., Fleissbach A., Laczko E., Schulze-Aurich J. and Zeyer J. 2001. Assessing soil biological characteristics: a comparison of bulk soil community DNA-, PLFA-, and Biolog™-analyses. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**, pp 1029-1036.
- Zak J.C., Willig D.L., Moorhead D.L., Wildman H.G. 1994. Functional diversity of microbial communities: a quantitative approach. *Soil Biology and Biochemistry*, **26**, pp 1101-1108.