

« QUALITE BIOLOGIQUE » DES SOLS CULTIVES : EVOLUTION DES CONCEPTS ET DES OUTILS DE DIAGNOSTIC

Rémi CHAUSSOD et Rachida NOUAÏM
S.E.M.S.E.

Les rencontres du COMIFER et du GEMAS visent principalement à promouvoir les analyses de sol pour améliorer les pratiques de fertilisation et d'entretien des sols. Ces 14^{èmes} rencontres à Dijon en 2019, c'est à la fois le lieu et le moment de rappeler l'évolution des concepts et des méthodes pour l'étude du fonctionnement (micro)biologique des sols cultivés et des applications agronomiques. La Région Bourgogne Franche-Comté a vu naître Louis Pasteur à Dole en 1822 ; ce premier grand microbiologiste de l'histoire a aussi fait des études à Besançon et a enseigné à Dijon (avant Strasbourg, Lille et Paris). Et c'est à Dijon que l'INRA a créé le premier Laboratoire de Microbiologie des Sols, au début des années 1970.

Avant 1970, l'agronomie et la microbiologie avaient peu de contacts. La profession agricole avait pratiquement comme seul objectif de produire plus, ce qu'elle réussit à faire après la seconde guerre mondiale grâce à la mécanisation, l'amélioration génétique, l'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires. On se préoccupait alors de la fertilité des sols avec des approches relevant principalement de la chimie agricole, sans grande considération des aspects biologiques. Signalons quand même les travaux de Drouineau & Lefèvre (1949) sur la minéralisation de l'azote en incubation et ceux de Y. Dommergues (1960) et G. Bachelier (1968) sur la respiration des sols. A la suite des travaux de Pasteur, la microbiologie des sols a pris son essor grâce à S. Winogradsky, qui y a consacré 50 ans de travaux, de 1885 à 1945, dont la moitié à l'Institut Pasteur de Paris. Dès 1923, le microbiologiste américain S. Waksman (*In MacLaren, 1977*) exposait les questions à résoudre pour expliquer **et utiliser** les relations entre fonctionnement biologique des sols cultivés et production végétale. Un autre microbiologiste américain, M. Alexander publiait en 1965 son « *Introduction to Soil Microbiology* », remarquable traité de microbiologie descriptive et fonctionnelle, où les processus biologiques sont mis en perspective de leur importance agronomique et environnementale. Hormis les mesures de minéralisation du carbone et de l'azote évoquées plus haut (et qui sont aujourd'hui normalisées), la microbiologie restait essentiellement « pasteurienne » dans ses méthodes (Pochon et Tardieu, 1962).

La décennie 1970-80 a marqué un profond changement à cet égard. Au début des années 70, l'INRA créait à Dijon un Laboratoire de Microbiologie des Sols, rattaché au Département de Science du Sol et dirigé par G. Catroux, avec dès l'origine une forte orientation vers les applications agronomiques et environnementales : aspects microbiens de la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses, cycle interne de l'azote et épuration par le sol, dégradation des pesticides...

En 1976, la jeune revue « *Soil Biology and Biochemistry* » (créée en 1969) publiait les travaux de Jenkinson et son équipe de Rothamsted, qui allaient véritablement révolutionner la microbiologie des sols. Cet ensemble remarquable de 5 articles, faisant suite à des travaux préliminaires de D. Jenkinson (1966) et à la thèse de D. Powlson qu'il avait dirigée, posait les bases de la **notion de Biomasse Microbienne** et de sa mesure. Pour la première fois, on disposait d'une méthode précise et fiable pour quantifier cette fraction « vivante » de la matière organique (Jenkinson & Powlson, 1976) et ouvrant la voie à une **approche compartimentale des cycles du carbone et de l'azote** distinguant les pools vivant (actif), labile et stable de la matière organique.

La décennie 1980-90, a vu le développement de divers modèles conceptuels des cycles du carbone et de l'azote, en Grande Bretagne, en Suède, aux USA, avec la biomasse microbienne comme moteur (ex : modèle NCSOIL de Molina *et al.*, 1983 ; Houot *et al.*, 1989). La motivation des chercheurs était de mieux comprendre et représenter les cycles couplés du carbone et de l'azote. Mais l'utilisation de ces modèles pour des simulations ouvrait sur des applications agronomiques très intéressantes telles que la prévision de l'évolution à long terme des stocks organiques en fonction du régime de restitution des résidus de récolte, ou des conséquences de pratiques culturales sur la minéralisation de l'azote, ce qui était en phase avec les préoccupations montantes de la société face à la contamination des eaux par les nitrates. Des préoccupations concernant la **pollution des sols** sont apparues à la même époque, liées au recyclage agricole de produits résiduels d'origine urbaine (boues, composts).

Les années 80 ont également été marquées par le programme suédois « Ecology of Arable Land », animé par le Pr T. Rosswall, (Univ. Uppsala). Pour la première fois, une approche intégrée d'écologie microbienne du sol était appliquée à l'étude des sols cultivés. De 1979 à 1987, des travaux très importants ont été menés dans le cadre de ce projet (ex : Rosswall & Paustian, 1984), où les approches naturalistes d'écologie croisaient les approches mécanistes de l'agronomie, l'ensemble débouchant sur une formalisation avancée du fonctionnement biologique des sols cultivés.

Plus largement, le milieu des années 80 a vu s'établir les bases théoriques et pratiques pour l'étude des propriétés biologiques des sols. Une *Conference on Biological Processes and Soil Fertility* s'est tenue en 1983 à Reading (GB) sous les auspices de la Société Internationale des Sciences du Sol (Tinsley & Darbyshire, 1984), avec -entre autres- une communication intitulée *Biological and biochemical analysis of soils* par l'australien J. Waid (1984). De cette époque date la prise de conscience, au niveau de l'Union Européenne, que la protection des sols doit s'appuyer sur les connaissances solides et la mobilisation de la communauté scientifique. C'est ce qui a été fait lors du colloque *Scientific basis for soil protection* organisé par la Commission de Communautés Européennes à Berlin en 1986 (Barth & L'Hermite, 1987). Enfin, au cours de la décennie 1980-90 les nouveaux outils d'investigation ont donné lieu aux premières applications concrètes, les résultats des mesures biologiques étant mises en relation avec le type de sol et les pratiques culturales. L'étude de l'influence du type de sol a montré que les paramètres texture, pH et taux de matière organique avaient une influence prépondérante sur les caractéristiques biologiques (Chaussod *et al.*, 1986).

La décennie 1990-2000 a vu émerger la notion de « **qualité des sols** », élargissant les perspectives, tandis que la conservation des sols est devenue une priorité concernant la société toute entière. Le concept de qualité des sols a rapidement fait consensus au sein de la communauté scientifique et s'est avéré tout à fait adapté pour rendre compte de la multifonctionnalité des sols et de la complexité de leur fonctionnement. Aux USA, ce concept a été précisé et approfondi par des spécialistes de science du sol et de l'agronomie lors d'un symposium à Minneapolis en 1992 (Doran *et al.*, 1994). En France, l'Association Française d'Etude des Sols (AFES) a édité en 1996 un numéro spécial de la revue *Etude et Gestion des Sols* consacré à ce sujet ; la notion de qualité biologique des sols y était abordée, faisant référence à l'abondance, l'activité et la diversité des organismes vivants (Chaussod, 1996).

En matière de protection des sols, l'Association Française d'Etude des Sols (AFES) a également joué un rôle central, en particulier avec l'implication de M. Robert (1992), pour sensibiliser les décideurs et l'opinion publique. Un premier projet de Directive Européenne sur la protection des sols est apparu à cette époque avec la Recommandation R92(8) de l'U.E. En France, un état des lieux avait été commandé par les Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement à M. Bornand (pédologue à l'INRA-Montpellier) et publié en 1997. Un premier Observatoire de la Qualité des Sols a commencé à être mis en place peu après (Martin *et al.*, 1999), mais il a été rapidement abandonné et remplacé par le *Réseau de Mesure de la Qualité des Sols* (RMQS). Ce dernier avait comme priorités d'établir l'état de contamination des sols français par les éléments-traces métalliques et de quantifier les stocks de carbone organique conformément au protocole de Kyoto de 1997.

Il est important de signaler ici l'engagement très précoce d'organisations professionnelles pour la protection des sols et pour la **durabilité** des systèmes de production. En Champagne, suite à de premières mesures réalisées en 1988-89 sous forme d'enquête, le Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne (CIVC) lançait en 1990 le programme « Viti 2000 » destiné à choisir les itinéraires techniques les plus respectueux de la qualité des sols et de l'environnement. Le programme, initialement prévu pour 10 ans, durera au total près de 20 ans, en abordant également la comparaison de modes de production (Descôtes *et al.*, 1998). Des travaux comparables, combinant réseaux de surveillance et expérimentations de longue durée, ont été initiés à la fin des années 90 dans d'autres régions, notamment en Bourgogne et dans le Beaujolais, grâce à une collaboration étroite entre chercheurs et professionnels. L'intérêt pratique de mesures biologiques a été démontré à cette époque et s'est progressivement étendu dans le monde agricole (Chaussod, 1997, Chaussod *et al.*, 2000). Dès 1993, le COMIFER et le GEMAS avaient ouvert leur tribune à des communications sur ce sujet (Chaussod et Houot, 1993). L'influence des pratiques culturales a été étudiée sur des expérimentations agronomiques (Houot et Chaussod, 1995), puis sur des essais ou des parcelles agricoles ordinaires en collaboration avec des Instituts Techniques et des organisations professionnelles.

La décennie 2000-2010 a vu s'élargir considérablement le champ des activités relatives à la qualité biologique des sols. Alors que le RMQS se mettait en place (Arrouays *et al.*, 2003), la notion de **biodiversité** montait en puissance. Cette notion a été popularisée suite au *Sommet de la Terre* de Rio-de-Janeiro en 1992 et sa Convention sur la Diversité Biologique. Dans le secteur qui nous intéresse, elle a véritablement émergé dans les années 2000 (Chevassus-au-Louis, 2007, 2008). Au plan scientifique, cela s'est traduit entre autres par la synthèse *Biological diversity and function in soil*, éditée par la Société Britannique d'Ecologie (Bardgett *et al.*, 2005). Dans le domaine de la microbiologie des sols, un champ immense s'est ouvert avec l'extraction directe de l'ADN du sol, mais de nombreuses limitations subsistent (Martin-Laurent *et al.*, 2001) et l'approche génotypique, très réductionniste, est d'un intérêt pratique limité. Malgré les progrès de la génomique, la biodiversité microbienne reste encore du domaine de la recherche. Au niveau européen, un document préparatoire à la Directive-cadre Européenne sur la Protection des Sols (Commission de Communautés Européennes, 2006) citait la « perte de biodiversité » comme l'une des 8 menaces pesant sur les sols ; mais, pour la partie microbienne de la biocénose des sols et indépendamment des problèmes méthodologiques, il n'y a pas de consensus sur quoi mesurer et pour quoi faire.

En France, grâce notamment aux programmes « BioIndicateurs » de l'ADEME, de nombreux travaux ont été menés durant la décennie 2000-2010 sur les indicateurs biologiques de la qualité des sols, en particulier le RMQS-BioDiv-Bretagne (Cluzeau *et al.*, 2012, Ponge *et al.*, 2012). Dans le cadre du programme « Bioindicateurs II », de très nombreux bio-indicateurs potentiels relatifs à l'abondance, l'activité et la diversité des organismes du sol ont été utilisés et leurs performances ont été testées dans des situations variées : forêts, sols cultivés, sols contaminés (Bispo *et al.*, 2009). Des travaux similaires se sont poursuivis (et certains se poursuivent actuellement) dans le cadre de projets CASDAR, pour des usages agronomiques.

La décennie 2010-2020 est marquée par la poursuite des travaux relatifs à la qualité des sols (démarrés dans les années 1990) et à la biodiversité (démarrés dans les années 2000). Au plan de l'utilisation agronomique des indicateurs biologiques, on atteint une certaine maturité comme en témoignent les nombreuses communications aux rencontres COMIFER-GEMAS de ces dernières années (ex : Valé *et al.*, 2011, Bouthier *et al.*, 2015, Nouaïm & Chaussod 2015, Deschamps *et al.*, 2019), ou dans la pratique professionnelle (Chaussod *et al.*, 2018 ; Nouaïm *et al.*, 2019). Mais, à ces préoccupations qui perdurent se sont ajoutées de nouvelles demandes adressées par la société aux chercheurs et à la profession agricole, concernant les changements climatiques, leurs impacts et leur mitigation éventuelle. Ainsi, à l'occasion de la COP 21 de Paris en 2015, la France a lancé « l'initiative 4 pour 1000 » ; l'objectif est de stocker chaque année pendant 20 ans une quantité de

carbone correspondant à 0,4% de leur teneur actuelle (Soussana *et al.*, 2017). Il s'agit d'un véritable défi scientifique car, au-delà des motivations légitimes des promoteurs de cette « initiative », cela soulève de nombreuses questions scientifiques non résolues (Pellerin *et al.*, 2019). Des données sérieuses laissent à penser que non seulement cet objectif est irréaliste (Poulton *et al.*, 2018), mais qu'enrichir fortement les sols en matières organiques pourrait avoir des conséquences imprévues et potentiellement dommageables pour d'autres aspects de la qualité des sols. Toujours est-il qu'aujourd'hui, ce sont les aspects « stockage du carbone » et « réservoir de biodiversité » qui sont mis en avant par le Ministère de l'Environnement -MTES- (Antoni *et al.* 2109), alors que les professionnels restent très attachés à la notion d'**agriculture durable** dans toutes ses dimensions, y compris économique et sociale.

En guise de conclusion,

Pour le monde agricole au sens large, la situation est devenue très complexe car les contraintes se sont accumulées en couches successives : il faut continuer à produire au meilleur coût, sans polluer l'environnement (eaux, sols, GES...), en préservant la biodiversité, en utilisant le moins d'intrants possible (énergie, produits phytosanitaires), et si possible en stockant du carbone de façon durable dans les sols. Par ailleurs, la société du 21^{ème} siècle n'est plus celle du 20^{ème} et la vision des sols a changé ; la notion de **services écosystémiques** qu'ils rendent (Dominati *et al.*, 2010) avec sous-jacente la marchandisation possible de ces services, a remplacé la notion plus neutre de **multifonctionnalité**. La société exerce aussi un droit de regard de plus en plus pesant sur la gestion des sols cultivés, sans en avoir toujours les compétences.

Pour s'en tenir aux aspects scientifiques et techniques, les outils méthodologiques développés ces dernières décennies peuvent-ils être mobilisés pour aider les professionnels ? Pour être vraiment utile, un indicateur biologique doit être : i) pertinent au plan agronomique, ii) mesurable de façon fiable, précise et à un coût abordable, iii) interprétable. Bien entendu, il n'existe pas de bio-indicateur d'usage universel pouvant répondre à toutes les questions qui se posent au plan agronomique et environnemental. En revanche, plusieurs paramètres validés par la communauté scientifique internationale sont utilisables pour répondre aux préoccupations relevant de la gestion organique et de la fourniture d'azote par les sols. Dans la pratique, il convient tout d'abord de préciser les objectifs visés, en identifiant explicitement la problématique et les fonctions du sol concernées, afin de choisir les indicateurs les plus appropriés, en toute connaissance de leur intérêt et de leurs limites. Il faut enfin s'appuyer sur des référentiels d'interprétation solides pour transformer les mesures en outils de diagnostic ou d'aide à la décision.

Le projet AgroEcoSol (Valé *et al.*, 2019) se positionne clairement sur une utilisation en routine, dès la prochaine décennie, d'indicateurs sélectionnés à la fois sur leur pertinence agronomique et sur leur rapport performance/coût. Les indicateurs biologiques viendront ainsi logiquement compléter les paramètres physico-chimiques classiques pour le diagnostic et le conseil. Un conseil agronomique avisé ne peut cependant se baser uniquement sur des analyses de laboratoire ; la connaissance du terrain reste incontournable, ne serait-ce que pour une bonne appréciation du contexte pédologique et de contraintes physiques telles que tassement, hydromorphie, etc. Sans forcément aller jusqu'à la réalisation d'un « profil cultural » pour chaque prélèvement de sol, le « test bêche » mériterait d'être pratiqué chaque fois que possible. En revanche la réalisation au champ de mesures biologiques comme le « tea bag index » (Barbot *et al.*, 2019), le « carbone actif » (facilement oxydable) ou le « slack test » (stabilité structurale), ne présente généralement qu'un intérêt pédagogique. Ces méthodes, très popularisées par leurs promoteurs outre-Atlantique, ne présentent pas de performances suffisantes en termes de fiabilité et de précision pour être utilisées valablement comme outils d'aide à la décision.

Bibliographie

- Alexander M. 1967. Introduction to soil microbiology. John Wiley & Sons, 472 p.
- Antoni V., Larrieu C., Lévêque A. et Ricard E. 2019. Le sol, un rôle essentiel pour l'environnement. *In* : L'environnement en France, MTES / CGDD, rapport de synthèse, pp 48-56.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Ratié C., Saby N. et Grolleau E. 2003. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) de France. *Etude et Gestion des Sols*, **10** (4), pp 241-250.
- Bachelier G. 1968. Contribution à l'étude de la minéralisation du carbone dans les sols. Mémoire ORSTOM n° 30, 145 p.
- Barbot C. 2019. Est-il possible de quantifier l'activité biologique des sols avec la méthode « Tea Bag Index » ? *In* ; 14^{èmes} Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse, Dijon, 20-21/11/2019.
- Bardgett R.D., Usher M.B. and Hopkins D.W. (Eds) 2005. Biological diversity and function in soil. British Ecological Society, Cambridge University Press, 402 p.
- Barth H. and L'Hermite P. 1987. Scientific basis for soil protection in the European Community. Elsevier Applied Science, 630 p.
- Bispo A., Grand C. et Galsomies L. 2009. Le programme ADEME « Bioindicateurs de la qualité des sols » : vers le développement et la validation d'indicateurs biologiques pour la protection des sols. *Etude et Gestion des sols*, **16**, pp 145-158.
- Bornand M. 1997. Connaissance et suivi de la qualité des sols en France. Etat des lieux. Besoins en données. Propositions pour une gestion raisonnée de la ressource en sol. Rapport d'expertise demandé par les Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement et de l'INRA, 176 p.
- Bouthier A., Trochard R., Labreuche J., Valé M., Nouaïm R. et Chaussod R. 2015. Valoriser les indicateurs microbiologiques en grandes cultures et polyculture-élevage. *In* : 12^{èmes} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER GEMAS, Lyon, 18-19/11/2015. Communication orale + actes 10 p.
- Chaussod R. et 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*, Actes des 4^{es} Journées de l'Analyse de Terre (GEMAS) et 5^{es} Forum de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER), Blois, 16-18/11/93, Decroux et Ignazi (Eds.), pp 17-26.
- Chaussod R. 1996. La qualité biologique des sols. Evaluation et implications. *Etude et Gestion des sols*, **3**, pp 261-278.
- Chaussod R. 1997. Comment définir (et mesurer) la qualité biologique des sols ? *Chambres d'Agriculture*, supplément au n° **856**, pp 23-27.
- Chaussod R., Breuil M.C., Nouaïm R., Lévêque J. et Andreux F. 2000. Des mesures microbiologiques pour évaluer la fertilité des sols viticoles. *La revue des Œnologues*, **95**, pp 19-22.
- Chaussod R., Letessier I., Marion J., Moncomble D., Descôtes A., Meurgues O., Trarieux C., Cahurel J.Y., Chatelet B. et Nouaïm R. 2018. Connaissance et suivi de la qualité des sols en vignobles septentrionaux. Partie 1 / 2 : Pédologie et résilience des sols viticoles. *La revue des Œnologues*, **169**, pp 15-17.
- Chevassus-au-Louis B. 2007. La biodiversité. Un nouveau regard sur la diversité du vivant. I. Immensité et complexité. *Cahiers Agricultures*, **16**, pp 219-227.
- Chevassus-au-Louis B. 2008. La biodiversité. Un nouveau regard sur la diversité du vivant. II. Stabilité et utilité. *Cahiers Agricultures*, **17**, pp 51-57.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A et 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.
- Commission des Communautés Européennes. 2006a. Stratégie thématique en faveur de la protection des sols. COM (2006) 231 final, 13 p.
- Commission des Communautés Européennes. 2006b. Directive du Parlement Européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE, 31 p.

- Deschamps T., Bouthier A., Cusset E., Houot S., Laurent N., Leclerc B., Perrin A.S., Recous S., Riah-Anglet W., Roussel P.Y., Trinsoutrot-Gattin I. Et Valé M. 2019. Evaluation sur des essais au champ d'indicateurs de microbiologie des sols – Premiers resultants du projet Microbioterre. *In* ; 14^{èmes} Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse, Dijon, 20-21/11/2019.
- Descôtes A., Moncomble D., Perraud A., Doledéc A.F., Cluzeau D., Pérès G. et Chaussod R. 1998. Programme Viti 2000 en Champagne : production intégrée et préservation de la qualité des terroirs viticoles. *In* : ANPP – 17^{ème} Conférence du COLUMA, Dijon, 9-11/12/1998, pp 1055-1063.
- Dominati E., Patterson M. And MacKay A. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystems services of soils. *Ecological Economics*, 69, pp 1858-1868.
- Dommergues Y. 1960. La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *Agronomie Tropicale*, 15, pp 54-60.
- Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F. and Stewaet B.A. (Eds) 1994. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication n°35, 244 p.
- Drouineau G. et Lefèvre G. 1949. Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Annales Agronomiques*, 19, pp 518-536.
- Houot S., Molina J.A.E., Chaussod R. and Clapp C.E. 1989. Simulation by NCSOIL of net mineralization in soils from the « Deherain » and « 36 parcelles » field at Grignon. *Soil Science Society of America Journal*, 53, pp 451-455.
- Houot S. and Chaussod R. 1995. Impact of agricultural practices on the size and activity of the microbial biomass in a long-term field experiment. *Biology and fertility of soils*, 19, pp 309-316.
- Jenkinson D.S. 1966. Studies on the decomposition of plant material in soil. II. Partial sterilisation and the soil microbial biomass. *Journal of Soil Science*, 17, pp 280-302.
- Jenkinson D.S. and Powlson D.S. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method to measure the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 8, pp 209-213.
- Mac Laren A.D. 1977. The seven questions of Selman A. Waksman. *Soil Biol. Biochem.*, 9, pp 375-376.
- Martin S., Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Ciesielski H., Gaultier J.P., Lavelle P., Legros J.P., Leprêtre A. et Sterckeman T. 1999. Le suivi de la qualité des sols en France. La contribution de l'Observatoire de la Qualité des Sols, *Etude et Gestion des Sols*, 6, pp 215-230.
- Martin-Laurent, F., Philippot L., Hallet S., Chaussod R., Germon J.C., Soulas G. and Catroux G. 2001. DNA extraction from soils : old bias for new microbial diversity analysis methods. *Applied and Environmental Microbiology*, 67, pp 2354-2359.
- Molina J.A.E., Clapp C.E., Shaffer M.J., Chichester F.W. and Larson W.E. 1983. NC SOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil : description, calibration and behaviour. *Soil Science Society of America Journal*, 47, pp 85-91.
- Nouaïm R. et Chaussod R. 2015. Biodiversité microbienne et qualité du sol : des indicateurs à portée agronomique. *In* : 12^{èmes} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER GEMAS, Lyon, 18-19/11/2015. Communication orale + actes 10 p.
- Nouaïm R., Cahurel J.Y., Crozier P., Bidaut F., Sauvage D., Descôtes A., Moncomble D., Letessier I. et Chaussod R. 2019. Connaissance et suivi de la qualité des sols en vignobles septentrionaux. Partie 2 / 2 : Pratiques culturales et durabilité de la viticulture. *La Revue des Œnologues*, 170 pp 19-21.
- Pellerin S., Barrière L. et al. 2019. Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Expertise collective. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 114 p.
- Pochon A. et Tardieu A. 1962. Techniques d'analyse en Microbiologie du Sol. Editions de La Tourelle (St Mandé), 112 p.
- Ponge J.F., Pérès G., Guernion M., Ruiz-Camacho, N., Cortet J., Pernin C., Villenave C., Chaussod R., Martin-Laurent F., Bispo A ; et Cluzeau D. 2013. The impact of agricultural practices on soil biota : A regional study. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, pp 271-284.
- Poulton P.R., Johnston A.E., McDonald A.J., White P.R. and Powlson D.S. 2018. Major limitations to achieving 4 per 1000 increases in soil organic carbon stock in temperate regions : evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, UK. *Global Change Biology*, 24, pp 2563-2584.

- Robert M. 1992. Le sol, ressource naturelle à préserver pour la production et l'environnement. *Cahiers Agricultures*, **1**, pp 20-34.
- Rosswall T. and Paustian K. 1984. Cycling of nitrogen in modern agricultural systems. *Plant & Soil*, **76**, pp 3-21.
- Soussana J.F., Lutfalla S., Ehrhardt F., Rosenstock T., Lamanna C., Havlik P., Richards M., Wollenberg E., Chotte J.L., Torquebiau E., Ciais P., Smith P and Lala R. 2017. Matching policy and science : rationale for the "4 per 1000 – soils for food security and climate" initiative. *Soil & Tillage Research*, **188**, pp 2-14.
- Tinsley J. and Darbyshire J.F. (Eds) 1984. Biological processes and soil fertility. Proceedings of commissions III and IV of the ISSS jointly with BSSS, Reading, July 1983. Nijhoff & Junk, The Hague (NL), 403 p.
- Valé M., Bouthier A., Trochard R., Chaussod R. et Nouaïm-Chaussod R. 2011. Pertinence de nouveaux indicateurs pour évaluer l'impact des pratiques culturales sur le fonctionnement biologique des sols *In* : 10èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse. COMFER GEMAS, Reims, 23-24 Nov. 2011.
- Waid J.S. 1984. Biological and Biochemical analysis of soils. *Plant & Soil*, **76**, pp 127-137.