

Enjeux et contributions des prairies temporaires pour améliorer la fertilité des sols

Séverine Piutti^{1,2}, Nicolas Romillac^{1,2}, Aline Chanseau^{1,2,3},
Sophie Slezack-Deschaumes^{1,2}, Vincent Manneville³, Bernard Amiaud^{4,5}

1 : Université de Lorraine, Laboratoire Agronomie et Environnement, UMR 1121, TSA 40602, F-54518 Vandœuvre cedex ; severine.piutti@univ-lorraine.fr

2 : INRA, Laboratoire Agronomie et Environnement, UMR 1121, TSA 40602, F-54518 Vandœuvre cedex

3 : Institut de l'Elevage, 9, allée Pierre de Fermat, Service Environnement, F-63170 Aubière

4 : Université de Lorraine, UMR 1137, Ecologie et Ecophysiologie Forestière, F-54500 Vandœuvre-lès-Nancy

5 : INRA, UMR 1137, Ecologie et Ecophysiologie Forestière, F-54280 Champenoux

Résumé

Le concept de fertilité des sols a évolué au cours de l'histoire pour aboutir actuellement à une définition s'appuyant sur la notion de composantes fonctionnelles, à la fois chimique, biologique et physique. Dans cette conception, la matière organique des sols est un pilier central de la fertilité et les micro-organismes du sol sont des acteurs majeurs permettant la libération d'éléments minéraux pour répondre aux besoins de plantes cultivées. Dans un contexte d'amélioration de la durabilité des systèmes de culture, l'intégration des prairies temporaires et/ou artificielles dans la rotation permet à court terme d'améliorer le rendement des cultures annuelles suivantes mais aussi de modifier la quantité et/ou la qualité des matières organiques et d'influencer à moyen terme les propriétés biologiques des sols.

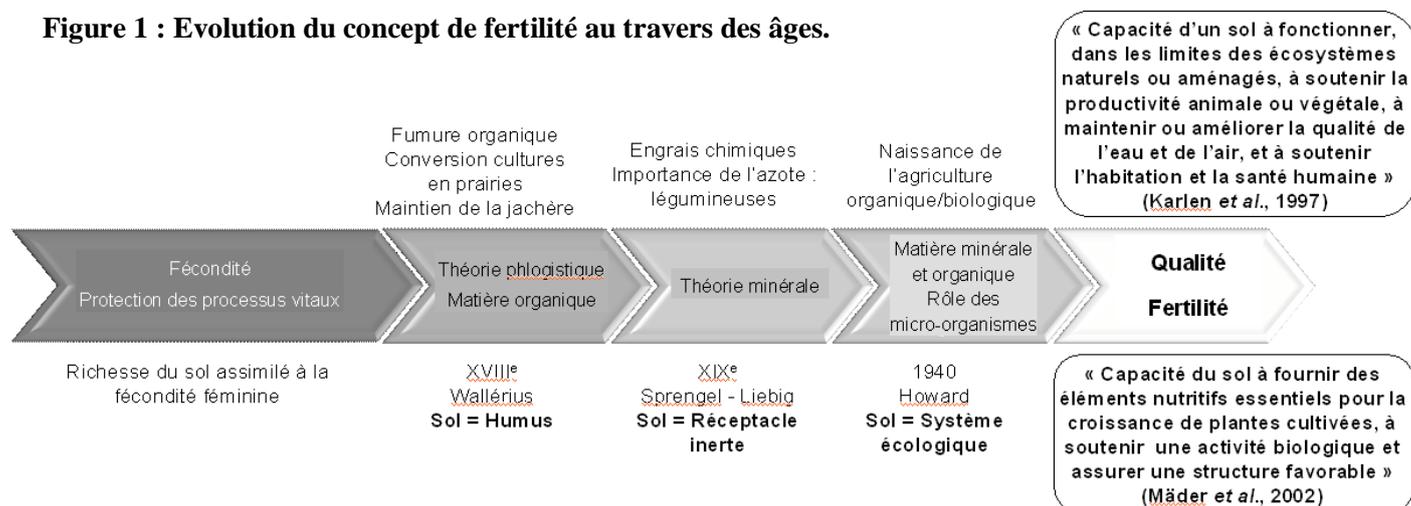
1. Définition de la fertilité des sols

– Les évolutions du concept de fertilité au cours de l'histoire

De nombreux auteurs mettent en évidence que les premières mentions dans la littérature du terme fertilité du sol sont très anciennes. PATZEL *et al.* (2000) mettent ainsi en avant certaines caractéristiques d'une conception de la fertilité des sols, qui initialement portaient sur le côté spirituel de la nature. Dans la mythologie grecque, les Dieux chthoniens assurent deux fonctions essentielles dans la vie des hommes : ils assurent la richesse du sol et ils règnent sur le royaume des morts. Dans ce contexte, à en juger par les divinités présentes dans les différentes civilisations (Demeter, Ceres...), le sol est souvent regardé comme un élément féminin qui porte la vie et protège les processus vitaux. De l'antiquité jusque vers 1840, cette aptitude du sol à produire a été apparentée au terme de fécondité renvoyant implicitement au concept de mère nourricière (Figure 1). Pendant cette période, les scientifiques s'appuient sur la "théorie du phlogistique" basée les éléments définis par Aristote : la terre, l'air, l'eau, le feu.

Reprenant des idées traditionnelles, la "théorie de l'humus", élaborée progressivement à la fin du XVIII^e siècle, semble avoir été formulée pour la première fois en 1761, dans les travaux du suédois WALLERIUS. Selon cette théorie, la matière organique du sol, ou l'humus du sol, était considérée comme la principale source de la fertilité des sols. Les racines des plantes sont alors soupçonnées d'extraire l'humus du sol pour le transformer en substance végétale, en le combinant avec de l'eau (cité dans WAKSMAN, 1942). Partant de ce postulat, THAER fut le premier agronome à utiliser la notion de fécondité naturelle ou fertilité intrinsèque lorsqu'il tenta de développer une approche de quantification des niveaux de production. Ces travaux mirent en évidence que la fertilité intrinsèque était liée à la texture du sol, à la teneur en humus et en calcaire. Dans cette théorie, les pertes occasionnées par les récoltes sont compensées selon trois moyens : (i) l'utilisation de fumures organiques, (ii) la conversion des terres cultivées en prairies, (iii) l'installation d'une jachère pendant l'interculture estivale (THAER, cité dans FELLER *et al.*, 2003). Ces trois piliers sont indissociables encore aujourd'hui de certains systèmes d'exploitation qui s'appuient essentiellement sur la fertilité organique des sols (biodynamie, agriculture biologique...). Indépendamment du soutien de cette théorie de l'humus par les premiers chimistes, une opposition à cette théorie allait provenir de plusieurs côtés. SPRENGEL fut le premier à remettre en question la théorie en attribuant peu de valeur nutritive à la matière organique et en suggérant que les éléments minéraux des plantes proviennent de l'extérieur. En 1840, LIEBIG montre que les plantes peuvent se développer sans composés organiques et avance que d'autres substances (*i.e.* éléments minéraux) peuvent remplacer la fumure organique. À la "théorie phlogistique" a ainsi succédé la "théorie minérale", selon laquelle la gestion de la fertilité des sols peut être basée uniquement sur les apports d'éléments minéraux sous forme d'engrais chimiques. Il s'agit dès lors de l'avènement de l'agrochimie qui a conduit au développement d'un modèle agricole où le sol constitue un support inerte, réceptacle d'éléments chimiques dans lequel les plantes se nourrissent. L'acceptation de cette théorie minérale conduit à la mise sous silence de la théorie de l'humus puisque les deux concepts ne pouvaient pas coexister. Cette situation se poursuit jusqu'en 1940, lorsque HOWARD affirme que la préservation de la matière organique des sols est essentielle pour préserver la productivité agricole dans le sens où le recyclage permanent de la matière organique couplé à l'altération minérale de la roche-mère peut maintenir la fertilité des sols. Sa vision des sols en tant que système écologique dans lequel les micro-organismes constituent un pont entre l'humus et la plante permet de remettre la matière organique au cœur de la fertilité des sols en tant qu'effecteur de fonctions susceptibles de libérer des nutriments pour la plante.

Figure 1 : Evolution du concept de fertilité au travers des âges.



- De la fertilité à la qualité des sols

La fertilité correspond à la capacité d'un sol à produire les récoltes désirées (COOKE, 1967) et ainsi les sols fertiles seraient des écosystèmes adaptés à la production agricole (JANSSON, 1967). La recherche actuelle de définition précise de ce terme communément utilisé depuis plusieurs siècles laisse néanmoins toujours apparaître que cette notion appartient plus au langage courant que scientifique (PATZEL *et al.*, 2002) (Tableau 1). La notion de fertilité reste ainsi actuellement encore floue et correspond pour les agronomes à « un jugement global de valeur sur la qualité d'un milieu nécessaire à la satisfaction de la production végétale » (COMIFER).

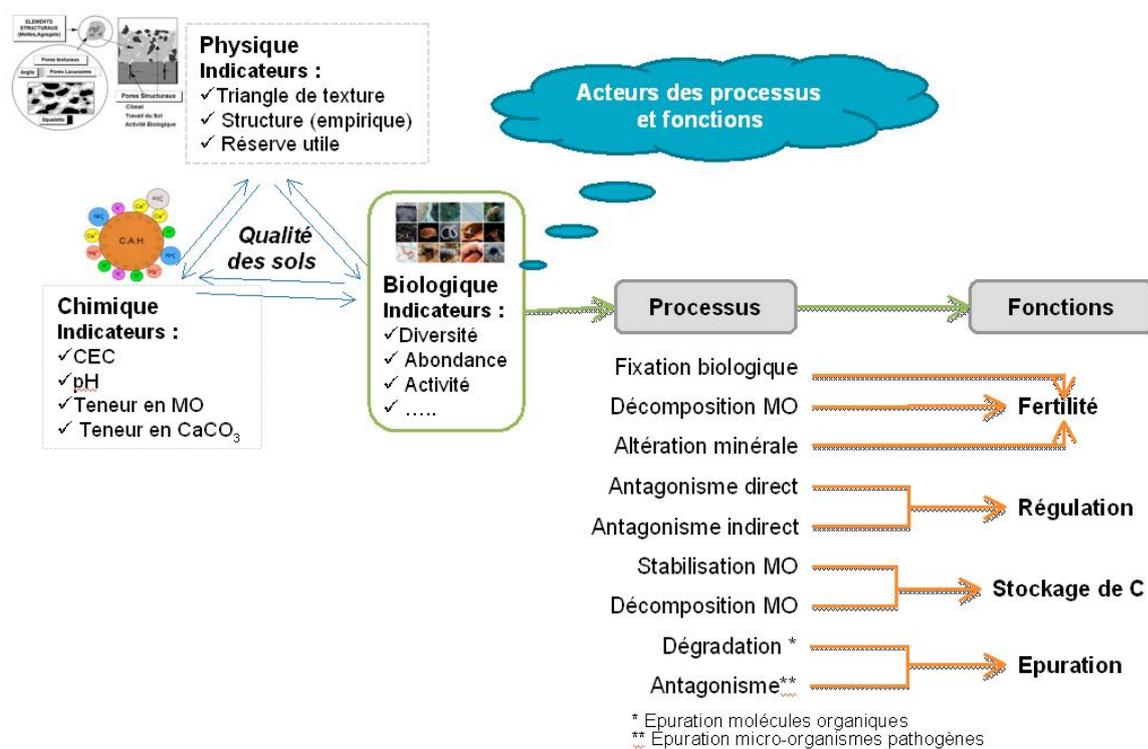
Tableau 1 : Exemple de définitions de la fertilité des sols.

Définition	Référence	Commentaires
<i>"The capacity of soil to produce the crop desired"</i>	COOKE, 1967	La notion de fertilité est liée à la capacité de production
<i>"de tous temps la fertilité des sols a été une préoccupation liée à la mise en valeur par l'homme du milieu naturel et à son exploitation pour satisfaire certaines de ses besoins"</i>	SEBILLOTE, 1989	La notion de fertilité reste floue et appartient plus au langage courant que scientifique.
<i>"the ability of the land to produce and reproduce; its capacity to support the growth of plants over time, under given climate and other relevant conditions"</i>	INGRAM, 1990	Prise en compte des conditions environnementales
<i>"facilité avec laquelle, pendant toute la durée de la culture, le système racinaire peut bénéficier à partir de ce sol en quantités suffisantes et au moment opportun des différents facteurs de la croissance végétale (chaleur, eau, éléments minéraux, matière organique,) et avoir une croissance suffisante pour prospecter de nouvelles zones du sol non appauvries"</i>	MOREL, 1996	La notion de fertilité est centrée sur les conditions qui favorisent la croissance et l'activité du système racinaire.
<i>"la capacité du sol à assurer durablement la productivité primaire d'un écosystème"</i>	TRICHET <i>et al.</i> , 1999.	Ecosystème forestier Approche temporelle de la fertilité
<i>"A fertile soil provides essential nutrients for crop plant growth, supports a diverse and active biotic community, exhibits a typical soil structure, and allows for an undisturbed decomposition"</i>	MADER <i>et al.</i> , 2002	Cette définition correspond à celle sur laquelle s'appuient les systèmes en agriculture biologique.
<i>"the capacity of soil to produce a large harvest"</i>	AUGUSTO <i>et al.</i> , 2002	Ecosystèmes forestiers
<i>"the ability of a soil to serve as a suitable substrate on which plants can grow and develop in a sustainable way"</i>	IZAC, 2003	Systèmes agroforestiers
<i>"the capacity of soil to provide physical, chemical and biological requirements for growth of plants for productivity, reproduction and quality (considered in terms of human and animal wellbeing for plants used as either food or fodder) relevant to plant type, soil type, land use and climatic conditions".</i>	ABBOTT <i>et</i> MURPHY, 2003	La notion de fertilité s'apparente à la notion de qualité des sols avec les composantes chimique, physique et biologique

A partir des années 1990 (Figure 1), le concept de qualité des sols commence à émerger dans la littérature scientifique. Dès lors, ces deux concepts, fertilité et qualité des sols, vont évoluer l'un vers l'autre, voire se rejoindre complètement. Selon KARLEN *et al.*, 1992, la qualité des sols est définie comme « *l'aptitude du sol à servir de milieu naturel pour la croissance des plantes nécessaires à la vie des animaux et des hommes* ». Cette première définition de la qualité des sols qui pouvait s'apparenter à la définition communément déclinée de la fertilité des sols a été élargie avec une prise en compte de l'ensemble des fonctions écologiques du sol. Il s'agit ainsi de la « *capacité d'un type de sol spécifique à fonctionner, dans les limites des écosystèmes naturels ou aménagés, à soutenir la productivité animale ou végétale, à maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et à soutenir l'habitation et la santé humaine* » (KARLEN *et al.*, 1997). La Société de Science du Sol Américaine (SSSA) définit la fertilité d'un sol comme : « *la qualité d'un sol lui permettant de fournir des éléments nutritifs en quantités adéquates et équilibrées entre elles pour assurer la croissance de plantes ou de cultures données* ». Ainsi, la définition retenue *in fine* pour la fertilité des sols utilise le terme qualité du sol en lieu et place des termes « capacité » ou « potentialité » du sol, utilisés précédemment (COOKE, 1967) de façon à considérer simultanément l'ensemble des fonctions attribuées aux sols, la fertilité n'étant que l'une des fonctions des sols parmi d'autres (Figure 2). Si cet élargissement de la définition de fertilité permet une prise en compte des fonctions du sol jusqu'alors négligées, voire

oubliées, il faut rester conscient que la définition de la qualité du sol par la détermination de ses fonctions écologiques contribuant à des services écosystémiques (Millenium Ecosystem Assesment) correspond à une vision anthropocentrée de la nature.

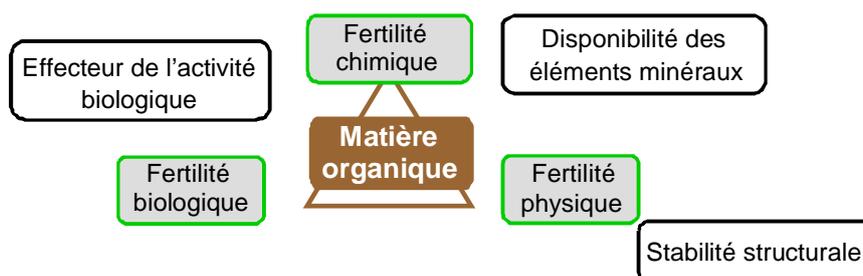
Figure 2 : La fertilité, une fonction des sols englobée dans la notion de qualité des sols.



- Quelle considération de la fertilité dans l'évolution des systèmes agricoles ?

Si la fertilité correspond à un potentiel de production agricole pour un sol, son expression dépend (i) des conditions environnementales (IGRAM, 1990), (ii) des pratiques agricoles mises en œuvre dans l'agrosystème. Selon FARDEAU (2006), la fertilité intrinsèque des sols rend compte actuellement de l'ordre de 20 à 25 % du rendement et les pratiques agricoles (énergie, engrais, pesticides...) rendent compte de 75 à 80 %. C'est ainsi qu'à l'échelle mondiale sur la période 1960-2000, la production mondiale de céréales a été multipliée par deux alors que, dans le même temps, l'utilisation d'engrais azoté a été multiplié par 7 (TILMAN *et al.*, 2002). Pendant cette période, la productivité des céréales est devenue beaucoup plus dépendante des engrais que de la fertilité intrinsèque des sols. La forte dépendance des systèmes de production agricoles aux engrais minéraux issus de la synthèse chimique a donc conduit à une perte d'efficacité, par exemple de l'utilisation de l'azote dans les systèmes agricoles (TILMAN *et al.*, 2002). Dans le contexte actuel de recherche de durabilité des systèmes de production agricole au travers notamment d'une intensification des fonctions écologiques des agroécosystèmes, FONTE *et al.* (2012) utilisent une définition intégrée de la fertilité des sols qui considère aussi bien la disponibilité des nutriments que le fonctionnement du sol et les services écosystémiques qu'il fournit. Si les plantes absorbent des éléments minéraux pour leur croissance et développement, la fertilité ne doit pas être réduite à une quantification du pool d'éléments nutritifs assimilables indépendamment de la prise en compte des processus contribuant à l'évolution de la taille de ce compartiment. Aussi, afin de ne pas se contenter d'une vision statique de la fertilité, il est indispensable d'introduire la notion de composantes fonctionnelles, chimique (fourniture des éléments nutritifs disponibles en quantité suffisantes), biologique (abondance, diversité et activité des êtres vivants) et physique de la fertilité (ABBOTT et MURPHY, 2003). Dans cette conception, la matière organique des sols devient alors un pilier central de la fertilité et de la durabilité des systèmes de culture (MANLAY *et al.*, 2007 ; Figure 3).

Figure 3 : La matière organique des sols, au cœur des composantes fonctionnelles de la fertilité des sols.



La dynamique des éléments minéraux est une composante fonctionnelle de la fertilité des sols qui est fonction des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols. En lien avec le cycle des éléments nutritifs, la décomposition/minéralisation des matières organiques du sol est une fonction majeure qui résulte d'une infinité de processus (activités enzymatiques diverses...). La fertilité résulte ainsi d'un ensemble de processus biologiques conditionnés par des facteurs physiques (structure du sol...), chimiques (teneur et qualité des matières organiques, pH, capacité d'échange cationique...), climatiques permettant d'influencer la dynamique des matières organiques et de ce fait les quantités de nutriments mises à disposition de la plante (STOCKDALE *et al.*, 2002 ; MARSCHNER et KALBITZ, 2003). D'un point de vue qualitatif, la matière organique peut être caractérisée notamment par des méthodes de fractionnement qui visent à déterminer la taille et la réactivité des différentes fractions (VON LÜTZOW *et al.*, 2007). Sachant que la décomposition est essentiellement assurée par la biomasse microbienne, des modèles récents de décomposition des matières organiques introduisent des paramètres microbiens comme la taille et le turnover du pool d'enzymes du sol responsables de la décomposition et de la production de biomasse microbienne (SCHIMMEL et WEINTRAUB, 2003).

Les pratiques agricoles en système conventionnel sont essentiellement axées sur la composante chimique de la fertilité en recherchant notamment des rendements maximaux *via* une fertilisation minérale et/ou organique soutenue ciblée sur les besoins de la plante et négligeant souvent les pratiques agricoles susceptibles de maximiser les fournitures du sol *via* ses fonctions écologiques. Dans les systèmes en agriculture biologique, l'entretien de la fertilité repose principalement sur l'utilisation de matières organiques d'origine animale (fumier) ou végétale (compost), sur la culture d'engrais verts et l'introduction de légumineuses dans les rotations. La fertilité est ainsi le résultat de processus biologiques et non de la seule présence d'éléments chimiques. La durabilité, en matière de fertilité, sera assurée pour autant que les fonctions écologiques majeures du sol soient favorisées par des pratiques agricoles appropriées. **Le levier majeur pour préserver la fertilité dans ces systèmes est de réintégrer les prairies temporaires et/ou artificielles comme élément central de la rotation culturale.** L'intégration de la prairie dans la rotation permet (i) de réduire le travail du sol qui peut être à l'origine d'une décomposition accrue de matière organique, d'une réduction de la structure du sol et d'une perte de biodiversité, (ii) d'assurer une entrée continue de carbone dans le sol notamment au travers de la litière et de l'activité du système racinaire (rhizodéposition et turnover), ce carbone étant essentiel pour la croissance des micro-organismes impliqués dans les processus de décomposition/minéralisation. En France, entre 1990 et 2010, la surface dédiée aux prairies permanentes a diminué de 1,6 million ha au profit des cultures (ADEME, Rapport 2014). Au sein des exploitations qui exercent une activité d'élevage, les rotations les plus fréquentes sont celles alternant les céréales à paille et maïs (31 % des surfaces) et la rotation céréales à paille - maïs - prairie temporaire (13 %), avec une bonne représentation de cette dernière en Pays de la Loire, Bretagne et Basse-Normandie (AGRESTE, Rapport 2014). Pour les exploitations en systèmes céréaliers, si, en agriculture biologique, la prairie temporaire est une tête de rotation très présente (64 % des surfaces), elle ne représente que 16 % des surfaces en agriculture conventionnelle. L'intégration de la prairie temporaire en rotation dans les systèmes de culture français reste encore marginale à l'heure actuelle, en dépit des nombreux enjeux agronomiques et environnementaux sous-jacents.

2. Quelles contributions de la prairie temporaire et/ou artificielle à la fertilité des sols ?

Si la fertilité correspond à un potentiel de production agricole pour un sol dont l'expression dépend des conditions environnementales et des pratiques agricoles mises en œuvre, de nombreux essais ont été conduits sur différents continents afin d'analyser les effets de l'introduction de la prairie temporaire en rotation sur le rendement des cultures suivantes (pour revue : RUSSEL, 1977 ; JOHNSTON *et al.*, 2009 ; FRANZLUEBBERS *et al.*, 2014). Les effets dépendent à la fois de la nature des sols, de l'utilisation des engrais minéraux, de la teneur en matière organique, des espèces prairiales implantées (présence ou non de légumineuses) et du nombre d'années de rotations effectuées incluant la prairie temporaire.

– Impact de l'intégration de la prairie dans la rotation sur la teneur en matière organique des sols

Il existe de grandes disparités de teneur en matière organique à l'échelle du territoire français. La matière organique est traditionnellement importante dans les zones d'élevage avec les surfaces en prairies et les apports réguliers d'effluents organiques. Dans les régions de grandes cultures françaises, l'intensification des pratiques culturales en lien avec une simplification des systèmes a conduit à une diminution des taux de matières organiques du sol (FARDEAU *et al.*, 1988). Il existe ainsi un gradient selon le mode d'occupation des sols et, pour les sols cultivés, selon la spécialisation des systèmes d'exploitation. Une analyse de l'évolution des systèmes de culture depuis 1970 montre que la diminution des surfaces de prairies tant permanentes que temporaires, au profit de cultures annuelles et notamment du maïs fourrager, explique en partie les diminutions de teneur en matière organique des sols français (BALESDENT *et al.*, 1996). Cette tendance est amplifiée par l'abandon de l'élevage dans certaines régions, réduisant de ce fait les retours de carbone au sol sous forme d'effluents d'élevage.

La teneur en matière organique des sols dépend à la fois des quantités de carbone organique restituées au sol (*i.e.* entrées) et de la vitesse de décomposition de la matière organique (*i.e.* les sorties). Les agriculteurs peuvent utiliser différentes voies d'entrée de carbone organique dans les sols cultivés, notamment la restitution des résidus de culture, l'épandage d'effluents d'élevage ou la diversification de la rotation avec intégration de la prairie temporaire (RUSSEL, 1977). Le remplacement des prairies par des cultures de maïs ensilage dans certaines régions comme la Lorraine ou la Bretagne a ainsi réduit considérablement les restitutions de carbone du fait d'une exportation de la quasi-totalité de la plante. L'augmentation de la vitesse de décomposition est notamment liée à la récurrence du labour, la suppression de la prairie de la rotation, l'absence d'engrais organiques et/ou engrais verts et le changement climatique (LOVELAND et WEBB, 2003).

A l'échelle des systèmes de production, l'intégration de la prairie (temporaire et/ou artificielle) en rotation avec les cultures fourragères et/ou les cultures de rente apparaît ainsi comme un levier susceptible d'agir positivement sur la matière organique des sols et donc sur la fertilité. La teneur en matière organique est généralement supérieure dans les rotations avec prairie temporaire (RUSSEL, 1977 ; LOVELAND et WEBB, 2003 ; VAN EEKEREN *et al.*, 2008 ; JOHNSTON *et al.*, 2009 ; GRIFFITHS *et al.*, 2010 ; FRANZLUEBBERS *et al.*, 2014) que dans des rotations de cultures annuelles. Le passage d'une culture annuelle à une végétation pérenne, qui s'accompagne d'une suppression du travail du sol, favorise le stockage de carbone, du fait d'apports de carbone plus élevés, d'une incorporation accrue par voie racinaire et d'une stabilisation des agrégats du sol qui protège la matière organique (BALESDENT *et al.*, 2000). La quantité de résidus de récolte sous une prairie temporaire de graminées et trèfles est en moyenne trois fois plus importante que sous une culture de céréales. Néanmoins, l'ordre de grandeur de ces augmentations de matière organique dépend de la texture des sols (Tableau 2, d'après LOVELAND et WEBB, 2003).

Les teneurs en carbone du sol sont ainsi 1,8 fois plus élevées dans une rotation intégrant une prairie temporaire (3 ans de prairie temporaire - maïs) (ACCOE *et al.*, 2002). Les prairies temporaires en rotation avec les cultures permettraient une augmentation de la teneur en carbone des sols conduisant à un stockage de carbone moyen sur le territoire français de 80 kg C/ha/an sur ces systèmes de cultures (DOLLE *et al.*, 2013).

Tableau 2 : Teneur moyenne en carbone organique (en %, sol tamisé à 2 mm) **des sols anglais et écossais en fonction du mode d'occupation et de la texture** (d'après LOVELAND et WEBB, 2003), n correspond au nombre de sols considérés, l'intervalle correspond à la gamme des valeurs (minimum-maximum).

Texture du sol	Carbone organique du sol (%)								
	Sols cultivés			Prairies temporaires			Prairies permanentes exploitées		
	n	Moyenne	Intervalle	n	Moyenne	Intervalle	n	Moyenne	Intervalle
Argile	290	3,38	1,2-9,9	72	4,3	1,3-10,9	208	5,45	1,3-10,9
Limons grossiers	430	1,97	0,5-8,1	125	3,05	0,9-9,0	281	4,06	1,1-11,9
Limons fins	651	2,60	0,5-10,9	306	3,51	1,0-12,0	631	4,34	1,1-11,5
Sable	75	1,75	0,4-9,1	7	2,29	0,7-4,5	28	2,59	0,6-5,4
Tourbe	54	19,75	12,1-56,4	12	20,98	12,2-49,2	54	20,61	12,2-52,7

LIU *et al.* (2006) ont fait une synthèse des effets de la diversification de la rotation sur les teneurs en carbone dans les sols agricoles. Ces auteurs soulignent deux points majeurs :

- La diversification de la rotation permet d'alterner les quantités et qualités biochimiques (ratio carbone/azote, composition) des litières. Dans leur méta-analyse, WEST et POST (2002) montrent ainsi que la teneur en C organique des sols est plus élevée dans les parcelles de blé en rotation qu'en monoculture. En comparaison avec une prairie permanente, la monoculture de coton est responsable d'une diminution de la teneur en C des sols dans les 5 premiers cm (ACOSTA-MARTINEZ *et al.*, 2004). Dans le cas d'une luzerne introduite sur plusieurs années, les niveaux de teneur en carbone organique du sol atteints sont plus importants que ceux mesurés en monoculture de maïs (YANG et KAY, 2001). L'introduction de légumineuses modifie la teneur en carbone des sols notamment en augmentant la teneur en carbone labile du sol (BLAIR et CROCKER, 2000). Ce pool labile, essentiel pour la fourniture d'éléments nutritifs *via* les processus de minéralisation se reconstitue au cours du cycle de développement des cultures au travers du retour de matière organique sous forme de résidus ou de rhizodépôts.

- De manière très prévisible, la teneur en azote total du sol augmente sous les rotations contenant des prairies temporaires en fonction de la matière organique puisque la majorité de l'azote du sol est sous forme organique. Cet effet est renforcé en présence de légumineuses dans les prairies temporaires étant donné l'apport de carbone organique sous forme de litière (aérienne et racinaire) caractérisée par une forte teneur en azote (AREF et WANDER, 1998).

La question d'une **valeur seuil de la teneur en matière organique** par rapport à la fertilité des sols est souvent posée (JOHNSTON, 1991 ; LOVELAND et WEBB, 2003). Néanmoins il apparaît encore difficile de fixer une valeur de référence sachant que cette valeur dépend d'une part de la texture des sols et d'autre part de la nature de la matière organique. En effet, c'est la fraction active de ce carbone qui est la plus susceptible d'expliquer la libération d'éléments nutritifs *via* une minéralisation rapide par les micro-organismes. Cette fraction active alimentée par les processus de rhizodéposition des plantes peut, de plus, stimuler le turnover des matières organiques stabilisées (*priming effect*) (CHENG et KUZYAKOV, 2005). Outre la teneur, la **qualité de la matière organique** est un paramètre majeur à prendre en compte notamment vis-à-vis des processus biologiques de décomposition/minéralisation. Dans ce contexte, différents auteurs ont mis en évidence des changements de proportion des différentes fractions de matière organique et des quantités de carbone organique soluble significativement plus faibles sous monoculture de maïs et rotation prairie temporaire - maïs comparativement à la prairie permanente (ACCOE *et al.*, 2002 ; GREGORICH *et al.*, 1994).

- Impact de l'intégration de la prairie dans la rotation sur l'abondance, la diversité et l'activité des micro-organismes

La succession d'espèces végétales différentes dans la rotation peuvent occasionner des modifications globales de la diversité biologique des sols et des fonctions assurées par cette dernière

notamment en relation avec les processus de décomposition et de minéralisation des matières organiques. La faune du sol, notamment la composante lombricienne, influence l'enfouissement, le brassage et le fractionnement de la matière organique dans le sol, favorisant de ce fait l'accessibilité des micro-organismes du sol à cette dernière. L'abondance et la diversité de cette composante sont fortement impactés par le mode d'occupation des sols et les pratiques culturales (PERES *et al.*, 2010).

Au sein de la diversité biologique des sols, de nombreuses études ont montré que **les propriétés microbiennes des sols** (biomasse microbienne carbonée et azotée, activité enzymatique, respiration) sont plus sensibles aux changements de pratiques agricoles qu'aux variations de teneur en matière organique (POWLSON *et al.*, 1987 ; BROOKES, 1995). La biomasse microbienne carbonée diminue selon le gradient écologique suivant : prairie permanente, prairie temporaire en rotation avec maïs, monoculture de maïs, et représente 3 % du C sous prairie temporaire en rotation avec maïs contre 2,5 % dans les deux autres conditions (ACCOE *et al.*, 2012). La taille de la biomasse microbienne carbonée est deux fois plus importante en rotation prairie temporaire - culture (964 kg carbone/ha) qu'en rotation de culture annuelle (518 kg carbone/ha). Cette biomasse microbienne explique notamment une minéralisation brute de l'azote supérieure de 46 % en rotation prairie temporaire - culture (MURPHY *et al.*, 2007). La biomasse microbienne sous prairie temporaire augmente d'autant plus que la diversité des espèces augmente dans la composition du mélange implanté (GUENAY *et al.*, 2013). Cet effet positif de la diversité spécifique est certainement lié à une plus grande quantité de litière et une diversité de qualité de cette litière du fait de la diversité d'espèces prairiales présentes (DE DEYN *et al.*, 2010).

Si l'abondance microbienne exprimée comme la biomasse microbienne carbonée des sols est significativement corrélée positivement avec la teneur en C organique des sols (WANG *et al.*, 2013), et peut être modifiée selon le niveau de diversité floristique de la prairie (GUENAY *et al.*, 2013), cela ne signifie pas pour autant que les **caractéristiques fonctionnelles** de cette biomasse sont modifiées. Les travaux de FONTAINE et BAROT (2005) et de EKSCHMITT *et al.* (2005) soulignent que les processus de décomposition et de minéralisation des matières organiques sont contrôlés par l'abondance mais aussi la diversité et l'activité métabolique des communautés microbiennes du sol. En effet, la composition des communautés microbiennes actives du sol influence le type et la nature des enzymes (en termes de spécificité de substrats) synthétisées, enzymes qui sont impliquées dans la dégradation des matières organiques (SINSABAUGH *et al.*, 2008 ; GIANFREDA et RUGGIERO, 2006). Plusieurs travaux ont mis en évidence que des pratiques culturales susceptibles de modifier la dynamique des matières organiques, telles que la rotation (ACOSTA-MARTINEZ *et al.*, 2007), le travail du sol (FREY *et al.*, 1999) ou encore le type et le niveau de fertilisation (SUZUKI *et al.*, 2009), influencent l'abondance, la structure et la diversité des communautés microbiennes du sol. Les prairies sont des écosystèmes où la diversité microbienne peut atteindre 10 000 espèces/g de sol (TORSVIK *et al.*, 1996). La comparaison de la diversité microbienne entre prairie permanente et sol cultivé révèle notamment que l'écosystème prairial, du fait de sa stabilité, sélectionne plutôt des bactéries à croissance lente (stratégie k) alors que les bactéries à stratégie rapide (stratégie r) sont favorisées en sol cultivé (GARBEVA *et al.*, 2006). Le développement des techniques de pyroséquençage (méthode d'analyse génétique) sur sol ces dernières années permet de classer les taxons microbiens en fonction de leur représentativité dans des sols prairiaux ou cultivés (ACOSTA-MARTINEZ *et al.*, 2010a ; SHANGE *et al.*, 2012). Ainsi, il a été mis en évidence que l'introduction de la prairie dans la rotation peut augmenter le niveau de diversité génétique microbienne du sol et modifier la structure des communautés microbiennes et ce d'autant plus que la pérennité de la prairie est à l'origine de l'arrêt du travail du sol. De manière générale, l'alternance de cultures (ZELLES *et al.*, 1995 ; ALVEY *et al.*, 2003 ; YAO *et al.*, 2006) et des compositions floristiques contrastées dans les systèmes prairiaux favorise les communautés microbiennes notamment en maintenant les effectifs et la diversité génétique et spécifique (BENZIRI et AMIAUD).

Si de nombreux auteurs ont analysé l'effet de l'introduction de la prairie temporaire en rotation avec des céréales sur les teneurs en matière organique des sols, sur l'efficacité de l'utilisation des éléments minéraux et/ou les rendements des céréales, les conséquences sur le fonctionnement biologique des sols ne sont que peu abordées dans la littérature scientifique. **La question est de savoir si ces modifications d'abondance et de diversité sous prairie engendrent des différences de fonctionnalité des sols pouvant se répercuter sur les cultures suivantes au sein de la rotation.** Sur un essai de 36 ans, VAN EEKEREN *et al.* (2008) mettent en évidence que la prairie temporaire en rotation présente des niveaux de fonctionnement du sol (par ex. minéralisation de

l'azote, respiration) intermédiaires entre la prairie permanente et un sol cultivé. Pour aborder ces aspects de fonctionnalité, le suivi d'enzymes extracellulaires (enzymes excrétés de la cellule bactérienne) en lien avec les cycles biogéochimiques peut constituer un indicateur des processus de décomposition de la matière organique et de minéralisation de l'azote, du phosphore et du soufre dans les écosystèmes. Les activités enzymatiques en lien avec les cycles du C (betaglucosidase), N (uréase), P (phosphatase) et S (arylsulfatase) varient selon le mode d'occupation des sols et sont généralement plus élevées sous prairies que sous cultures (BANDICK et DICK, 1999 ; ACOSTA-MARTINEZ *et al.*, 2010b). Les activités phosphatase et arylsulfatase diminuent ainsi respectivement de 49 % et 65 % en sol cultivé par rapport à un sol sous prairie (GUPTA et GERMIDA, 1988). De plus, lorsque l'on considère une rotation, les activités sont plus élevées sous les rotations qui produisent le plus de matière organique comme les rotations incluant des surfaces de prairies (BANDICK et DICK, 1999 ; EKENLER et TABATABAI, 2002 ; KLOSE et TABATABAI, 2000 ; ACOSTA-MARTINEZ *et al.*, 2010b ; MARCINKEVICIENE *et al.*, 2013). FRIEDEL *et al.* (1996) affirment ainsi que la présence de résidus faciles à décomposer est à l'origine d'un pool de carbone labile qui rend mieux compte des activités enzymatiques que la teneur en matière organique du sol. Néanmoins, toutes les enzymes ne répondent pas de manière aussi sensible au changement de rotation dans toutes les situations (BENDING *et al.*, 2004) et le niveau de certaines activités est fortement lié à l'espèce végétale présente (CREGUT *et al.*, 2009) ou à la qualité biochimique des résidus du précédent cultural (ROMILLAC *et al.*, soumis).

Conclusion

Le maintien de la fertilité des sols est une préoccupation majeure des agronomes et des agriculteurs depuis de nombreuses années notamment parce que cette fertilité est intimement liée à la productivité des agroécosystèmes. Dans le contexte d'intensification écologique de l'agriculture, la prise en compte de la fertilité des sols se doit d'évoluer d'une notion de valeur (*i.e.* potentialité de production agricole) à une notion écologique pour laquelle le sol est un système capable de remplir différentes fonctions dont la fertilité. Parmi les pratiques agricoles, l'intégration des prairies temporaires et/ou artificielles dans la rotation permet d'améliorer le rendement des cultures annuelles suivantes de façon différentielle selon les exigences de ces dernières, de modifier la quantité et/ou qualité des matières organiques et d'influencer les propriétés biologiques des sols. De nombreux enjeux restent encore à développer pour améliorer la durabilité des systèmes de cultures en orientant les agriculteurs vers une réintroduction de la prairie dans la rotation. En effet, si le fonctionnement biologique est à la base de la fertilité des sols, il est actuellement difficile de disposer d'indicateurs biologiques pertinents (en lien avec l'abondance et/ou la diversité et/ou l'activité des organismes du sol) permettant de faire le lien entre les changements de pratiques agricoles et la fertilité. La difficulté réside notamment dans le fait que la fertilité est à aborder à la fois selon une dynamique temporelle (prise en compte (i) à court terme de la disponibilité en éléments nutritifs pour le cycle de développement de la culture mais aussi (ii) à moyen voire long terme des processus contribuant à l'évolution du pool d'éléments biodisponibles) et spatiale (prise en compte de la variabilité car le sol est un milieu hétérogène). Enfin, sachant que les sols sont à l'origine d'autres services, il est essentiel d'évaluer les compromis, synergies et antagonismes entre les différents types de services rendus par le sol (agronomiques, écologiques) en réponse à l'introduction des prairies dans les rotations.

Références bibliographiques

- ABBOTT LK., MURPHY DV. 2003. What is soil biological fertility? In: Soil Biological Fertility - A key to sustainable land use in agriculture. Eds. Abbott, L.K. and Murphy, D.V. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands pp 1-15
- ACCOE F., BOECKX P., VAN CLEEMPUT O., HOFMAN G., HUI X., BIN H., GUANXIONG C. 2002. Characterization of soil organic matter fractions from grassland and cultivated soils via C content and $\delta^{13}\text{C}$ signature. Rapid Communications in Mass Spectrometry. 16, 2157-2164.
- ACOSTA-MARTINEZ V., ZOBECK V., ALLEN VG. 2004. Soil microbial, chemical and physical properties in continuous cotton and integrated crop-livestock systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 68, 1875-1884
- ACOSTA-MARTINEZ, V., MIKHA, M. M., VIGIL, M. F. 2007. Microbial communities and enzyme activities in soils under alternative crop rotations compared to wheat-fallow for the Central Great Plains. Applied Soil Ecology 37, 41-52.

- ACOSTA-MARTINEZ, V., DOWD, SE., SUN, Y., WESTER, D., ALLEN, V. 2010a. Pyrosequencing analysis for characterization of soil bacterial populations as affected by an integrated livestock-cotton production system. *Applied Soil Ecology*. 45, 13-25.
- ACOSTA-MARTINEZ, V., BELL, CW., MORRIS BEL., ZAK J., ALLEN VG. 2010b. Long-term soil microbial community and enzyme activity responses to an integrated cropping-livestock system in a semi-arid region. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 137, 231-240.
- ADEME. Carbone organique des sols : l'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat. Rapport Juillet 2014. 27 pages
- AGRESTE. Enquête Pratiques culturales 2011, principaux résultats. Numéro 21. Rapport Juillet 2014. 72 pages
- ALVEY S., YANG C.H., BUERKERT A., CROWLEY D.E. 2003. Cereal/legume rotation effects on rhizosphere bacterial community structure in west african soils. *Biology and Fertility of Soils*, 37, 73-82.
- AREF S., WANDER MM. 1998. Long-term trends of corn yield and soil organic matter in different crop sequences and soil fertility treatments on the morrow plots. *Advances in Agronomy*. 62, 153-197.
- AUGUSTO L., RANGER J., BINKLEY D., ROTHE A. 2002. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Ann. For. Sci.* 59, 233-253.
- BALESDENT J. 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 4, 245-260.
- BALESDENT J., CHENU C., BALABANE M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*. 53, 215-230.
- BANDICK A.K., DICK R.P. 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, 1471-1479.
- BENDING GD., TURNER MK., RAYNS F., MARX MC., WOOD M. 2004. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. *Soil Biology and Biochemistry*. 36, 1785-1792.
- BENZRI E., AMIAUD B., 2005. Relationship between plant and soil microbial communities in fertilized grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*. 37, 2055-2064.
- BLAIR N., CROCKER GJ. 2000. Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils. *Australian Journal of Soil Research*. 38, 71-84.
- BROOKES PC. 1995. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biol Fertil Soils* 19, 269-279
- CHENG W., KUZUYAKOV Y. 2005. Root effects on soil organic matter decomposition. In: Zobel RW, Wright, SF (eds.) *Roots and Soil Management: Interactions between Roots and the Soil*, Agronomy Monograph no. 48. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin.
- COOKE G.W. 1967. *The Control of Soil Fertility*. Crosby-Lockwood, London, 526 pp.
- CREGUT M., PIUTTI S., VONG P. C., SLEZACK-DESCHAUMES S., CROVISIER I., BENZRI E. 2009. Density, structure, and diversity of the cultivable arylsulfatase producing bacterial community in the rhizosphere of field grown rape and barley. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 704-710.
- DE DEYN G.B., QUIRK H., BARDGETT R.D. 2010. Plant species richness, identity and productivity differentially influence key groups of microbes in grassland soils of contrasting fertility. *Biology Letters* 7, 75-78.
- DOLLÉ J-B., FAVERDIN P., AGABRIEL J., SAUVANT D., KLUMPP K. 2013. Contribution de l'élevage bovin aux émissions de GES et au stockage de carbone dans les systèmes de production. *Fourrages*. 215, 181-191.
- EKENLER M., TABATABAI MA. 2002. B-Glucosaminidase activity of soils: effect of cropping systems and its relationship to nitrogen mineralization. *Biol Fertil Soils* 36, 307-376.
- EKSCHMITT K., LIU M., VETTER S., FOX O., WOLTERS V. 2005. Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability - Why is dead organic matter left over in the soil? *Geoderma* 128, 167-176.
- FARDEAU JC., GUIRAUD G., THIERY J., MORAL C., BOUCHER B. 1988. Taux net de minéralisation de la matière organique des sols de grande culture de Beauce: conséquences pour l'azote. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 74, 109-115.
- FARDEAU, J.C. 2006. Des indicateurs de la fertilité des sols. Communication, 33 pp.
- FELLER CL., THURIES LJM., MANLAY RJ., ROBIN, P., FROSSARD, E. 2003. "The principles of rational agriculture" by Albrecht Daniel Thaer (1752-1828). An approach to the sustainability of cropping systems at the beginning of the 19th century. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science - Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde*. 166, 687-698.
- FONTAINE, S., BAROT, S. 2005. Size and functional diversity of microbe populations control plant persistence and long-term soil carbon accumulation. *Ecology Letters* 8, 1075-1087.
- FONTE S.J., VANEK S., OYARZUN P., PARSA S., RAO I., QUINTERO D.C., LAVELLE P. 2012. Pathways to agroecological intensification of soil fertility management by smallholder farmers in the Andean highlands. *Advances in Agronomy*. 116, 125-184

- FRANZLUEBBERS AJ., SAWCHIK J., TABOADA MA. 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. *Agric. Ecosyst. Environ.* 190, 18-26.
- FREY SD., ELLIOTT ET., PAUSTIAN K. 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 573-585.
- FRIEDEL JK., MUNCH JC., FISCHER WR. 1996. Soil microbial properties and the assessment of available soil organic matter in a haplic luvisol after several years of different cultivation and crop rotation. *Soil Biol. Biochem.*, 28, 479-488.
- GARBEVA P., POSTMA J., VAN VEEN JA., VAN ELSAS DJ. 2006. Effect of above-ground plant species on soil microbial community structure and its impact on suppression of *Rhizoctonia solani* AG3. *Environmental Microbiology*. 8, 233-246.
- GIANFREDA L., RUGGIERO P. 2006. Enzyme Activities in Soil. In: P. Nannipieri and K. Smalla, Editors, *Nucleic Acids and Proteins in Soil* vol. 8, Springer, Berlin, pp. 257-311.
- GREGORICH EG., CARTER MR., ANGERS DA., MONREAL CM., ELLERT BH. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74, 367-385
- GRIFFITHS BS., BALL BC., DANIELL TJ. HALLETT PD., NEILSON R., WHEATLEY RE., OSLER G., BOHANEC M. 2010. Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. *Applied Soil Ecology*. 46, 43-53.
- GUENAY Y., EBELING A., STEINAUER K., WEISSER WW., EISENHAEUER N. 2013. Transgressive overyielding of soil microbial biomass in a grassland plant diversity gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 60, 122-124
- GUPTA VVSR., GERMIDA JJ. 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*. 6, 777-786.
- INGRAM J. 1990. The role of trees in maintaining and improving soil productivity – a review of the literature. In R.T. Prinsley, ed. *Agroforestry for sustainable production, economic implications*, pp. 243-303. London, Commonwealth Science Council.
- IZAC AM. 2003. Economic aspects of soil fertility. Management and agroforestry practices. In: Schroth G, Sinclair FL (eds) *Trees, crops and soil fertility*. CAB International, Oxfordshire, pp 13-20
- JANSSON SL. 1967. Soil organic matter and fertility. In: *Soil Chemistry and Fertility* (Ed. by C.V. Jacks). pp 1-10. Transactions of the International Society of Soil Science, Aberdeen, 1966.
- JOHNSTON AE. 1991. Soil fertility and soil organic matter: In: *Advances in Soil Organic Matter Research: The Impact on Agriculture and the Environment* (ed. W.S. Wilson), pp. 299-314. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- JOHNSTON AE., POULTON PR., COLEMAN K. 2009. Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in agronomy*. 101, 1-57.
- KARLEN DL. MAUSBACH MJ., DORAN JW., CLINE RG., HARRIS RF., SCHUMAN GE. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*. 61, 4-10
- KARLEN, DL., EASH NS., UNGER PW. 1992. Soil and crop management effects on soil quality indicators. *Amer. J. Alternative Agric.* 7, 48-55.
- KLOSE S., TABATABAI MA. 2000. Urease activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems. *Biol. Fertil. Soils*. 31, 191-199.
- LIU X., HERBERT SJ., HASHEMI AM., ZHANG X., DING G. 2006. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation – a review. *Plant Soil Environ.* 52, 531-543.
- LOVELAND P., WEBB J. 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research*. 70, 1-18.
- MANLAY RJ., FELLER C., SWIFT MJ. 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 119, 217-233
- MADER P., FLIESSBACH A, DUBOIS D, GUNST, L., FRIED P., NIGGLI U. 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*. 296, 1694-1697.
- MARCINKEVICIENE A., BOGUZAS V., BALNYTE S., PUPALIENE R., VELICKA R. 2013. Influence of Crop Rotation, Intermediate Crops, and Organic Fertilizers on the Soil Enzymatic Activity and Humus Content in Organic Farming Systems. *Eurasian Soil Science*. 46, 198-203.
- MARSCHNER B., KALBITZ K. 2003. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils. *Geoderma* 113, 211-235.
- MOREL R. 1996. Le sol : interface dans l'environnement, resource pour le développement. Masson (eds) 3^{ème} cycle et recherche. Collection Sciences de l'environnement. 244 pages
- MURPHY DV., STOCKDALE EA., POULTON PR., WILLISON TW., GOULDING WT. 2007. Seasonal dynamics of carbon and nitrogen pools and fluxes under continuous arable and ley-arable rotations in a temperate environment. *European Journal of Soil Science*. 58, 1410-1424.

- PATZEL N., STICHER H., KARLEN DL. 2000. Soil fertility - Phenomenon and concept. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science - Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde*. 163, 129-142.
- PERES G., BELLIDO A., CURMI P., MARMONIER P., CLUZEAU D. 2010. Relationships between earthworm communities and burrow numbers under different land use systems. *Pedobiologia* 54, 37-44.
- POWLSON DS., BROOKES PC., CHRISTENSEN BT. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in the total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol Biochem* 19, 159-164.
- ROMILLAC N., PIUTTI S., AMIAUD B., SLEZACK-DESCHAUMES S. Are soil protease and ammonification activities influenced by pea root traits? *Soumis à Soil Biology and Biochemistry*.
- RUSSEL EW. 1977. The role of organic matter in soil fertility. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 281, 209-219.
- SCHIMEL JP., WEINTRAUB MN. 2003. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 549-563.
- SEBILLOTTE M. 1989. *Fertilité et système de production*, Inra (Eds). Collection Ecologie et aménagement rural. 369 pages.
- SHANGE RS., ANKUMAH RO., IBEKWE AM., ZABAWA R., DOWD SE. 2012. Distinct Soil Bacterial Communities Revealed under a Diversely Managed Agroecosystem. *PLOS One*. 7, 1-10.
- SINSABAUGH RL., LAUBER CL., WEINTRAUB MN., AHMED B., ALLISON SD., CRENSHAW C., CONTOSTA AR., CUSACK D., FREY S., GALLO ME., GARTNER TB., HOBBI SE., HOLLAND K., KEELER BL., POWERS JS., STURSOVA M., TAKACS-VESBACH C., WALDROP MP., WALLENSTEIN MD., ZAK DR., ZEGLIN LH. 2008. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology Letters*. 11, 1252-1264.
- STOCKDALE EA., SHEPHERD MA., FORTUNE S., CUTTLE SP. 2002. Soil fertility in organic farming systems Fundamentally different? *Soil Use and Management*. 18, 301-308.
- SUZUKI C., NAGAOKA K., SHIMADA A., TAKENAKA M. 2009. Bacterial communities are more dependent on soil type than fertilizer type, but the reverse is true for fungal communities. *Soil Science and Plant Nutrition* 55, 80-90.
- TILMAN D., CASSMAN KG., MATSON PA., NAYLOR R., POLASKY S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. 418, 671-677
- TORSVIK V., SØRHEIM R., GOKSØYR J., 1996. Total bacterial diversity in soil and sediment communities-a review. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 17, 170-178.
- TRICHET P., JOLIVET CL., ARROUAYS D., LOUSTAU D., BERT D., RANGER J. 1999. Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime. *Etude et gestion des sols*. 6, 197-214.
- VAN EEKEREN N., BOMMELE L., BLOEM J., SCHOUTEN T., RUTGERS M., DE GOEDE R., REHEUL D., BRUSSAARD L. 2008. Soil biological quality after 36 days of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping. *Applied Soil Ecology*. 40, 432-446.
- VON LUTZOW M., KOGEL-KNABNER I., EKSCHMITTB K., FLESSA H., GUGGENBERGER G., MATZNER E., MARSCHNER B. 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 2183-2207.
- WAKSMAN SA. 1942. The microbiologist and soil organic matter. *Soil Science Society of America Proceedings*. 7, 16-21.
- WANG Q., XIAO F., HE T., WANG S. 2013. Responses of labile soil organic carbon and enzyme activity in mineral soils to forest conversion in the subtropics. *Annals of Forest Science*.
- WEST TO., POST WM. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation : a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1930-1946.
- YANG, X. M., KAY, B. D. 2001. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic Hapludalf in Southern Ontario. *Soil Tillage Res.* 59, 107-114.
- YAO H., JIAO X., WU F. 2006. Effects of continuous cucumber cropping and alternative rotations under protected cultivation on soil microbial community diversity. *Plant and Soil*. 284, 195-203.
- ZELLES L., RACKWITZ R., BAI Q.Y., BEESE F. 1995. Discrimination of microbial diversity by fatty acid profiles of phospholipids and lipopolysaccharides in differently cultivated soils. *Plant and Soil*, 170, 115-122.