

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

S. Piutti^{1,2}, N. Romillac^{1,2}, A. Chanseume^{1,2,3}, S. Slezack-Deschaumes^{1,2}, V. Manneville³, B. Amiaud^{4,5}

Le concept de fertilité des sols et le rôle joué par la matière organique ont beaucoup évolué. Un rapide retour historique souligne les enjeux du maintien de la fertilité des sols et les pratiques de gestion des prairies dans cette optique.

RÉSUMÉ

Le concept de fertilité des sols a évolué depuis l'Antiquité. Actuellement, sa définition s'appuie sur la notion de composantes fonctionnelles, à la fois chimiques, biologiques et physiques. 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 des 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 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.

SUMMARY

Using temporary pastures to enhance soil fertility

The definition of soil fertility has shifted through time; it is currently based on the idea of functional components that are chemical, biological, and physical in nature. According to this modern definition, a soil's organic matter content is a key component of its fertility, and soil microorganisms play a major role in releasing minerals that crops can use to meet their needs. As efforts are made to increase the sustainability of crop systems, incorporating temporary and/or artificial pastures into the rotation cycle may help increase crop yields in the short term. It can also change the levels and/or quality of soil organic matter and, in the intermediate term, influence a soil's biological properties.

1. Définition de la fertilité des sols

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

Les premières mentions dans la littérature du terme de fertilité du sol sont très anciennes et correspondent à certaines caractéristiques d'une conception de la fertilité des sols qui initialement portaient sur le côté spirituel de

la nature (PATZEL *et al.*, 2000). 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

AUTEURS

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

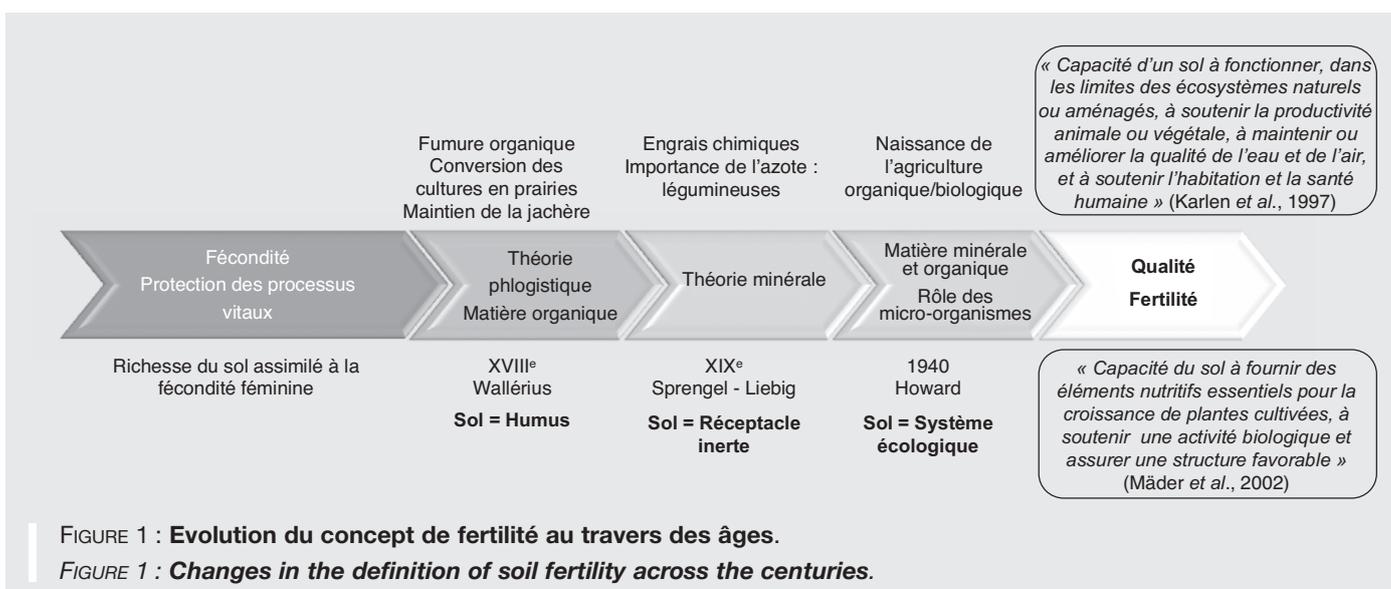
4 : Université de Lorraine, UMR 1137, Ecologie et Ecophysiologie Forestière, F-54500 Vandœuvre-lès-Nancy

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

MOTS CLÉS : Agriculture durable, Carbone, évolution, fertilité du sol, histoire, matière organique, micro-organisme, prairie, production agricole, rotation culturale, sol, système de production.

KEY-WORDS : Agricultural production, Carbon, change in time, crop succession, grassland, History, microorganism, organic matter, production system, soil, soil fertility, sustainable agriculture.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Piutti S., Romillac N., Chanseume A., Slezack-Deschaumes S., Manneville V., Amiaud B. (2015) : "Enjeux et contributions des prairies temporaires pour améliorer la fertilité des sols", *Fourrages*, 223, 179-187.



concept de mère nourricière (figure 1). Pendant cette période, les scientifiques s'appuient sur la « **théorie du phlogistique** » basée sur 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 (cité par WAKSMAN, 1942). 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. Partant de ce postulat, THAER fut le

premier agronome à utiliser la notion de fécondité naturelle ou de fertilité intrinsèque lorsqu'il tenta de développer une approche de quantification des niveaux de production agricole. 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 par 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

Définition	Référence	Commentaires
"The capacity of soil to produce the crop desired"	COOKE, 1967	La notion de fertilité est liée à la capacité de production
"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 certains de ses besoins"	SEBILLOTE, 1989	La notion de fertilité reste floue et appartient plus au langage courant que scientifique
"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"	INGRAM, 1990	Prise en compte des conditions environnementales
"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"	MOREL, 1996	La notion de fertilité est centrée sur les conditions qui favorisent la croissance et l'activité du système racinaire
"La capacité du sol à assurer durablement la productivité primaire d'un écosystème "	TRICHET et al., 1999	Ecosystème forestier. Approche temporelle de la fertilité
"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 "	MADER et al., 2002	Cette définition correspond à celle sur laquelle s'appuient les systèmes en agriculture biologique
"The capacity of soil to produce a large harvest"	AUGUSTO et al., 2002	Ecosystèmes forestiers
"The ability of a soil to serve as a suitable substrate on which plants can grow and develop in a sustainable way"	IZAC, 2003	Systèmes agroforestiers
"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"	ABBOTT et MURPHY, 2003	La notion de fertilité s'apparente à la notion de qualité des sols avec les composantes chimique, physique et biologique

TABEAU 1 : Exemples de définitions de la fertilité des sols.

TABLE 1 : Various examples of definitions of soil fertility.

biologique...). Indépendamment du soutien de cette théorie de l'humus par les premiers chimistes, une opposition à cette théorie allait être émise par plusieurs auteurs. SPRENGEL (cité par MANLAY *et al.*, 2007) 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 (cité par MANLAY *et al.*, 2007) 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. 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 (1943) affirme que la préservation de la matière organique des sols est essentielle pour préserver la productivité agricole car 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.

■ 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.*, 2000) et que **de nombreuses définitions coexistent** (tableau 1).

À 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**

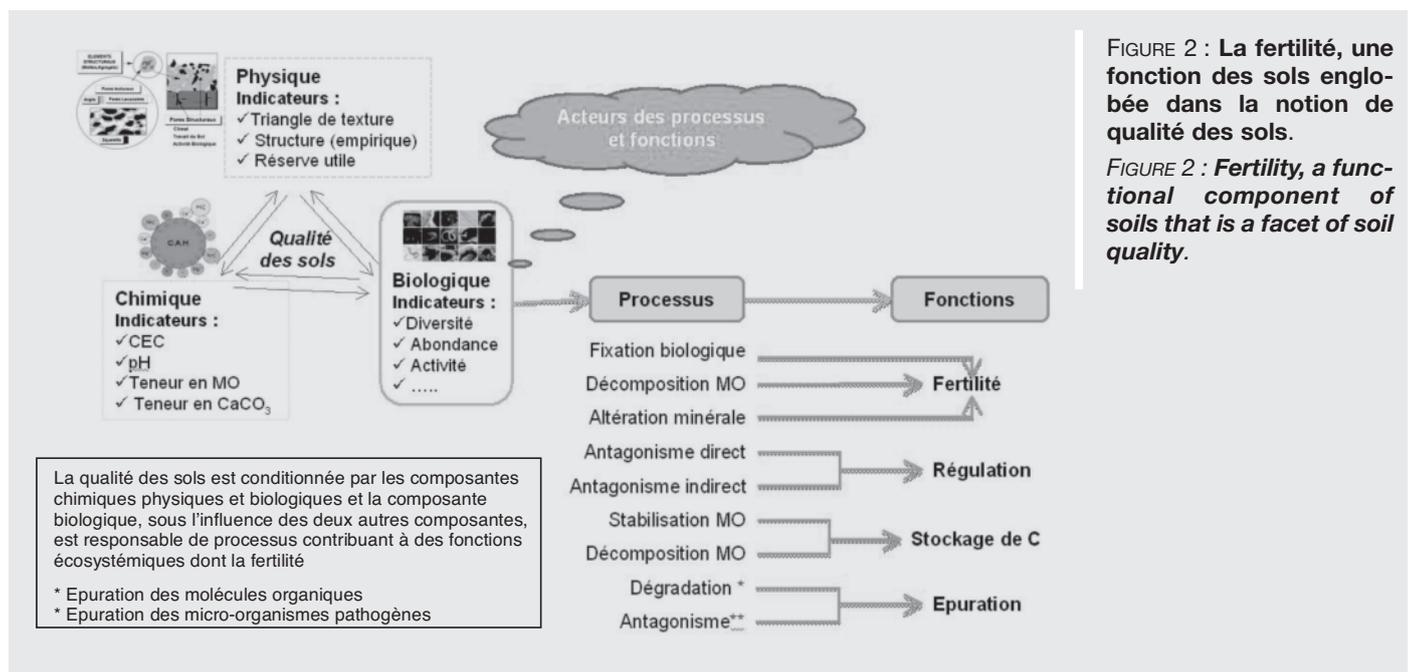


FIGURE 2 : La fertilité, une fonction des sols englobée dans la notion de qualité des sols.
 FIGURE 2 : *Fertility, a functional component of soils that is a facet of soil quality.*

écologiques contribuant à des services écosystémiques (Millennium Ecosystem Assessment) **correspond à une vision anthropocentrée de la nature.**

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

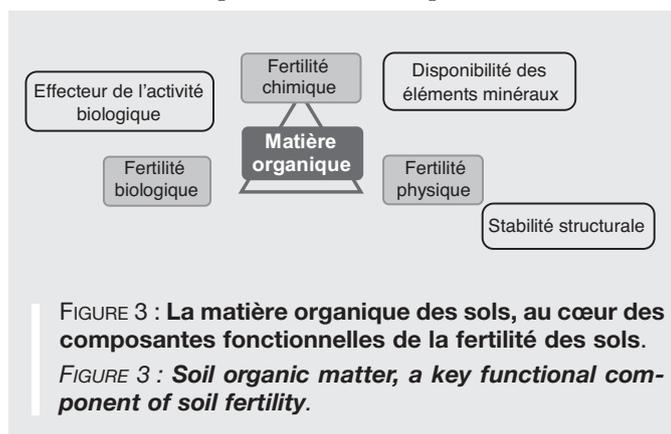
Si la fertilité correspond à un potentiel de production agricole pour un sol, son expression dépend i) des conditions environnementales (INGRAM, 1990) et ii) des pratiques agricoles mises en œuvre dans l'agrosystème. Selon FARDEAU (2006), **la fertilité intrinsèque des sols rend compte actuellement de 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 multipliée par sept (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. 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).

La fertilité résulte 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 pour 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 stabilité des différentes fractions (VON LÜTZOW *et al.*, 2007). La décomposition/minéralisation des matières organiques du sol est une fonction majeure qui résulte d'une infinité de processus (activités enzymatiques diverses...). 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 (SCHIMEL 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 dépit des nombreux enjeux agronomiques et environnementaux sous-jacents, l'intégration de la prairie temporaire en rotation dans les systèmes de culture français reste encore marginale à l'heure actuelle. Ainsi, en France, au sein des exploitations qui exercent une activité d'élevage, la rotation céréales à paille - maïs - prairie temporaire ne représente que 13 % des rotations. 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 (AGRESTE, Rapport 2014).



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

La fertilité correspond à un potentiel de production agricole pour un sol mais son expression dépend des conditions environnementales et des pratiques agricoles mises en œuvre ; c'est pourquoi 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 présentant des surfaces en prairies importantes et des 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** (BALESSENT, 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 biomasse aérienne. 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) à celle 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 (BALESSENT *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) et de la durée de la rotation (VERTES *et al.*, 2005).

LIU *et al.* (2006) ont fait une synthèse des **effets de la diversification de la rotation sur les teneurs en carbone**

Texture du sol	Sols cultivés			Prairies temporaires			Prairies permanentes exploitées		
	n*	Moyenne	Extrêmes	n*	Moyenne	Extrêmes	n*	Moyenne	Extrêmes
Argileuse	290	3,38	1,2-9,9	72	4,3	1,3-10,9	208	5,45	1,3-10,9
Limoneuse :									
- 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
Sableuse	75	1,75	0,4-9,1	7	2,29	0,7-4,5	28	2,59	0,6-5,4
Sol tourbeux	54	19,75	12,1-56,4	12	20,98	12,2-49,2	54	20,61	12,2-52,7

* n : nombre de sols considérés

TABLEAU 2 : Teneurs en carbone organique (en %, sol tamisé à 2 mm) de sols anglais et gallois en fonction du mode d'occupation et de la texture (d'après LOVELAND et WEBB, 2003).

TABLE 2 : Soil organic carbon content (in <2 mm air-dried soil) of soils in England and Wales subject to different land uses and belonging to different soil texture groups (after LOVELAND and WEBB, 2003).

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 carbone organique des sols est plus élevée dans les parcelles de blé en rotation qu'en monoculture. 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 biologique des sols

La succession d'espèces végétales différentes dans la rotation peut 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 modifiées selon 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 carbone sous prairie temporaire en rotation avec maïs contre 2,5 % dans les deux autres conditions (ACCOE *et al.*, 2002). 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 carbone 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). **Les prairies sont des écosystèmes où la diversité microbienne peut atteindre 10000 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. 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 les 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 (bêtaglucosidase), 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 ; MARCINKVICIENE *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.*, 2015).

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. 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.

Intervention présentée aux Journées de l'A.F.P.F.,
"La fertilité des sols sans les systèmes fourragers",
les 8 et 9 avril 2015

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBOTT L.K., MURPHY D.V. (2003) : "What is soil biological fertility?", *Soil Biological Fertility - A key to sustainable land use in agriculture*, Abbott L.K., Murphy D.V. eds., Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 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. DOWD S.E., 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 C.W., MORRIS B.E.L., ZAK J., ALLEN V.G. (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.

- AGRESTE (2014) : *Enquête Pratiques culturales 2011, principaux résultats*, 21, rapport Juillet 2014, 72 p.
- AREF S., WANDER M.M. (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. (2000) : "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 G.D., TURNER M.K., RAYNS F., MARX M.C., 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.
- BLAIR N., CROCKER G.J. (2000) : "Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils", *Australian J. Soil Research*, 38, 71-84.
- BROOKES P.C. (1995) : "The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals", *Biol Fertil Soils*, 19, 269-279
- CHENG W., KUZYAKOV Y. (2005) : "Root effects on soil organic matter decomposition", Zobel R.W., Wright S.F. (eds.), *Roots and Soil Management: Interactions between Roots and the Soil*, Agronomy Monograph, 48, ASA-SSSA, Madison, Wisconsin.
- COOKE G.W. (1967) : *The Control of Soil Fertility*, Crosby-Lockwood, London, 526 p.
- CREGUT M., PIUTTI S., VONG P.C., SLEZACK-DESCHAUMES S., CROVISIER I., BENIZRI 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.
- EKENLER M., TABATABAI M.A. (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 J.C. (2006) : "Des indicateurs de la fertilité des sols", *Communication*, 33 p.
- FARDEAU J.C., 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", *CR Académie d'Agriculture de France*, 74, 109-115.
- FELLER CL., THURIES L.J.M., MANLAY R.J., ROBIN, P., FROSSARD, E. (2003) : "The principles of rational agriculture", by Albrecht Daniel Thaeer (1752-1828). An approach to the sustainability of cropping systems at the beginning of the 19th century", *J. 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., PARSAS 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 A.J., SAWCHIK J., TABOADA M.A. (2014) : "Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America", *Agric. Ecosyst. Environ.*, 190, 18-26.
- FRIEDEL J.K., MUNCH J.C., FISCHER W.R. (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 J.A., VAN ELSAS D.J. (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", P. Nannipieri, K. Smalla eds., *Nucleic Acids and Proteins in Soil*, vol. 8, Springer, Berlin, 257-311.
- GREGORICH E.G., CARTER M.R., ANGERS D.A., MONREAL C.M., ELLERT B.H. (1994) : "Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils", *Can. J. Soil Sci.*, 74, 367-385.
- GRIFFITHS B.S., BALL B.C., DANIELL T.J., HALLETT P.D., NEILSON R., WHEATLEY R.E., OSLER G., BOHANEK 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 W.W., EISENHAEUER N. (2013) : "Transgressive overyielding of soil microbial biomass in a grassland plant diversity gradient", *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 122-124.
- GUPTA V.V.S.R., GERMIDA J.J. (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.
- HOWARD A. (1943) : *An Agricultural testament*, p 31 ; http://www.zetataalk3.com/docs/Agriculture/An_Agricultural_Testament_1943.pdf
- INGRAM J. (1990) : "The role of trees in maintaining and improving soil productivity - a review of the literature", R.T. Prinsley ed., *Agroforestry for sustainable production, economic implications*, 243-303, London, Commonwealth Science Council.
- IZAC A.M. (2003) : "Economic aspects of soil fertility. Management and agroforestry practices", Schroth G., Sinclair F.L. eds., *Trees, crops and soil fertility*, CAB International, Oxfordshire, 13-20.
- JANSSON S.L. (1967) : "Soil organic matter and fertility", *Soil Chemistry and Fertility*, C.V. Jacks ed., 1-10, Transactions of the International Society of Soil Science, Aberdeen, 1966.
- JOHNSTON A.E. (1991) : "Soil fertility and soil organic matter", *Advances in Soil Organic Matter Research: The Impact on Agriculture and the Environment*, ed. W.S. Wilson, 299-314, Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- JOHNSTON A.E., POULTON P.R., COLEMAN K. (2009) : "Soil organic matter : its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes", *Advances in agronomy*, 101, 1-57.
- KARLEN D.L., EASH N.S., UNGER P.W. (1992) : "Soil and crop management effects on soil quality indicators", *Amer. J. Alternative Agric.*, 7, 48-55.
- KARLEN D.L., MAUSBACH M.J., DORAN J.W., CLINE R.G., HARRIS R.F., SCHUMAN G.E. (1997) : "Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation", *Soil Science Society of America Journal*, 61, 4-10.

- KLOSE S., TABATABAI M.A. (2000) : "Urease activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems", *Biol. Fertil. Soils*, 31, 191-199.
- LIU X., HERBERT S.J., HASHEMI A.M., 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.
- MADER P., FLIESSBACH A., DUBOIS D., GUNST L., FRIED P., NIGGLI U. (2002) : "Soil fertility and biodiversity in organic farming", *Science*, 296, 1694-1697.
- MANLAY R.J., FELLER C., SWIFT M.J. (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.
- 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, ressource pour le développement*, Masson (eds), 3^e cycle et recherche, Collection Sciences de l'environnement, 244 p.
- MURPHY D.V., STOCKDALE E.A., POULTON P.R., WILLISON T.W., GOULDING W.T. (2007) : "Seasonal dynamics of carbon and nitrogen pools and fluxes under continuous arable and ley-arable rotations in a temperate environment", *European J. Soil Science.*, 58, 1410-1424.
- PATZEL N., STICHER H., KARLEN D.L. (2000) : "Soil fertility - Phenomenon and concept", *J. 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.
- POWELSON D.S., BROOKES P.C., CHRISTENSEN B.T. (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. (2015) : "Influence of pea root traits modulating soil bioavailable C and N effects upon ammonification activity", *Soil Biology and Biochemistry*, sous presse.
- RUSSEL E.W. (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 J.P., WEINTRAUB M.N. (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 éd., Collection Ecologie et aménagement rural, 369 p.
- SHANGE R.S., ANKUMAH R.O., IBEKWE A.M., ZABAWA R., DOWD S.E. (2012) : "Distinct Soil Bacterial Communities Revealed under a Diversely Managed Agroecosystem", *PLOS One*, 7, 1-10.
- SINSABAUGH R.L., LAUBER C.L., WEINTRAUB M.N., AHMED B., ALLISON S.D., CRENSHAW C., CONTOSTA A.R., CUSACK D., FREY S., GALLO M.E., GARTNER T.B., HOBBIE S.E., HOLLAND K., KEELER B.L., POWERS J.S., STURSOVA M., TAKACS-VESBACH C., WALDROP M.P., WALLENSTEIN M.D., ZAK D.R., ZEGLIN L.H. (2008) : "Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale", *Ecology Letters*, 11, 1252-1264.
- STOCKDALE E.A., SHEPHERD M.A., FORTUNE S., CUTTLE S.P. (2002) : "Soil fertility in organic farming systems ?Fundamentally different?", *Soil Use and Management*, 18, 301-308.
- TILMAN D., CASSMAN K.G., MATSON P.A., 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", *J. Industrial Microbiology and Biotechnology*, 17, 170-178.
- TRICHET P., JOLIVET C.L., 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.
- VERTES F., MENASSERI S., MORVAN T. (2005) : "Long term effect of the length of the grass period in ley-arable rotations on the quality of soil organic matter", *14th N workshop*, 116, 219-222, PRI Maastricht, NL.
- VON LUTZOW M., KOGEL-KNABNER I., EKSCHMIBT 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 S.A. (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 T.O., POST W.M. (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.



Association Française pour la Production Fourragère

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

www.afpf-asso.org



AFPF – Centre Inra – Bât 9 – RD 10 – 78026 Versailles Cedex – France

Tél. : +33.01.30.21.99.59 – Fax : +33.01.30.83.34.49 – Mail : afpf.versailles@gmail.com

Association Française pour la Production Fourragère