

**Jean ROGER-ESTRADE**

agronome

AgroParisTech, UMR Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

# Le sol, patrimoine vivant

**P**our l'agronome, la question de la fertilité du sol est bien évidemment centrale et ce concept a fait l'objet de nombreux débats. Beaucoup de définitions en ont été données, menant à des conceptions très différentes, voire divergentes lorsqu'elles opposaient les tenants d'une fertilité naturelle qu'il faut conserver aux partisans d'une fertilité produite par l'Homme.

L'agronome a longtemps considéré, en étudiant les sols, le seul service de support de la production. Ce point de vue a changé et les décisions en matière de gestion des sols cultivés sont désormais évaluées en considérant l'ensemble des services qu'il rend et qui sont essentiels au fonctionnement des écosystèmes. Parmi ces services, on peut citer le rôle de réservoir d'une fraction très importante de la biodiversité, ceux qui découlent de son rôle dans le cycle du carbone et de l'azote (le sol étant, suivant les cas, puits ou source de gaz à effet de serre, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO) ou bien encore les services résultant de sa position clef dans le cycle de l'eau, comme l'épuration de différents polluants (nitrates, pesticides...).

## Quelques considérations sur le concept de fertilité et son évolution

La production primaire d'un peuplement végétal étant le résultat de la photosynthèse, la production maximale théorique qu'il est possible d'obtenir en un endroit donné (le rendement potentiel) dépend d'abord de la quantité d'énergie lumineuse disponible. Pour



l'atteindre, il faut que chaque culture intercepte au mieux l'énergie lumineuse incidente, compte tenu des contraintes imposées par la variété (précocité, photopériodisme, exigences thermiques...). En général, le sol est limitant par rapport à l'atteinte de ce niveau théorique de production parce qu'il ne permet pas de satisfaire la totalité des besoins en eau et en éléments minéraux des cultures ou parce qu'il limite l'efficacité de prélèvement de ces facteurs par les racines. La fertilité du sol s'exprime donc négativement par rapport au potentiel et « le sol le plus fertile est celui qui entraîne le moins de diminution des potentialités culturales, (Sebillotte, 1993) ». Mais il faut souligner ici que le seul rendement est une variable qui ne suffit pas pour caractériser la fertilité d'un sol. En effet, une même baisse de production pouvant avoir des causes différentes, il est indispensable de déterminer quelles sont précisément les composantes (physiques, chimiques ou biologiques) du sol qui limitent la production, de manière à pouvoir agir dessus. Ces composantes de la fertilité sont par exemple le pH, la réserve en eau du sol, la taille et la diversité des communautés de microorganismes... On parle souvent de « fertilité chimique » ou de « fertilité physique » en regroupant les caractéristiques par catégorie.

Pour Sebillotte (1993), la fertilité « doit s'envisager relativement aux fonctions que le milieu doit remplir dans le processus de production ». Les composantes de la fertilité du sol sont donc non seulement les caractéristiques qui conditionnent le niveau de production, mais également celles qui déterminent les coûts et les conditions d'application des techniques culturales, la souplesse d'organisation du calendrier cultural ou la sécurité dans l'atteinte de l'objectif de rendement. Il propose d'ailleurs de parler « d'aptitude culturale » plutôt que de fertilité.

Cette vision est très centrée sur le service de support de production qui est très dépendant des facteurs mis en jeu par l'agriculteur (engrais, amendements, travail du sol, produits phytosanitaires). Elle est également très centrée sur les composantes physiques et chimiques du sol.

Si l'on se place dans une perspective où le processus de production serait rendu moins dépendant des intrants de synthèse, les critères d'évaluation de la fertilité doivent évoluer.

Il faut en particulier donner plus de poids à la composante biologique. Pour ne prendre que deux exemples, citons le rôle de cette composante vis-à-vis des possibilités de mise en œuvre des régulations biologiques (Mediene et al., 2011) et celui du rôle fondamental joué par les vers de terre sur l'évolution de la porosité (Capowiez et al., 2009), le cycle de la matière organique, la santé des plantes (Blouin et al., 2005). Par ailleurs, en se plaçant dans une perspective où l'enjeu est d'améliorer les performances énergétiques de l'agriculture en simplifiant le travail du sol, ce ne sont plus les mêmes critères qui entrent en jeu lorsque l'on

évalue la composante physique. Ainsi par exemple, l'aptitude à la fissuration sous l'effet du climat devient très importante à considérer lorsqu'il s'agit d'adopter le non-labour.

Enfin, si la fertilité du sol correspond encore très généralement à sa capacité à soutenir la fonction de production, le concept doit désormais prendre également en compte d'autres services rendus par les sols cultivés. On pense ici aux services écologiques 'sortants' : il s'agit des services hors production agricole, concernant l'eau (stockage, épuration), la régulation du climat (piégeage de gaz à effet de serre) ou la préservation de la biodiversité (non directement utile à la production agricole).

La fertilité du sol est donc un concept multicritère et évolutif. Par conséquent, la notion de fertilité, sa définition, son appréciation, dépendent beaucoup du contexte technique du processus de production. Par exemple, si l'on considère l'Agriculture Biologique, il s'agit moins d'apprécier les aptitudes du sol à se prêter à son artificialisation que d'évaluer quels sont les services qu'il peut rendre en matière de régulation des bio-agresseurs telluriques, de maintien d'une structure favorable, de fourniture d'éléments minéraux, d'efficacité de leur prélèvement par les racines, de service écosystémique sortant.

### **Gestion patrimoniale du sol : agir sur les composantes de la fertilité**

Dans la suite du texte, nous proposons de considérer successivement deux des trois classes de caractéristiques des sols cultivés que l'on dénomme classiquement les « composantes de la fertilité », en mettant l'accent sur quelques règles fondamentales pour leur gestion : les composantes biologique et physique, qui, à l'heure actuelle, sont au centre de beaucoup de débats autour de la nécessaire évolution des manières de produire. Pour une approche plus exhaustive de la gestion des sols cultivés, nous renvoyons le lecteur à des ouvrages généraux (e.g. Doré et al., 2006 ; Girard et al., 2011).

### **La composante biologique : le sol vivant...**

La biodiversité du sol recouvre une grande diversité d'organismes, qui peuvent être classés selon leurs tailles ou leurs fonctions (ces deux aspects étant pour partie liés). Les organismes qui constituent la composante biologique du sol comprennent ainsi des algues, des microorganismes (bactéries, champignons), la microfaune du sol (protozoaires, nématodes), la méso-faune (collembolles, acariens...) ainsi que la macro, voire la mégafaune du sol (animaux divers, carabes, vers de terre...). Tous ces organismes participent, d'une manière ou d'une autre, à la



formation et à l'évolution du sol (domaines de la pédologie) ainsi qu'à son fonctionnement (qu'étudient de nombreuses disciplines dont la science du sol, l'agronomie ou encore l'écologie). L'ordre de grandeur des effectifs des organismes les plus petits que l'on trouve dans un gramme de sol est considérable :  $10^8$  à  $10^9$  pour les bactéries,  $10^4$  à  $10^6$  pour les champignons,  $10^4$  à  $10^6$  pour les protozoaires (Gobat *et al.*, 2010). Ces valeurs varient énormément en fonction de la nature du sol, du climat et de la profondeur, la plupart des organismes vivant à proximité de la surface du sol, là où se concentrent leurs ressources trophiques. L'une des caractéristiques majeures de cette composante est l'extrême variabilité de sa distribution spatiale, quelle que soit l'échelle que l'on considère (Ettema et Wardle, 2001). Ainsi la distribution des bactéries varie beaucoup au sein des agrégats de sol mais aussi au sein d'un horizon donné (entre les zones riches et les zones pauvres en matières organique par exemple), ainsi qu'entre horizons, en fonction de la profondeur. Cet aspect rend difficile l'étude de la biologie du sol et la gestion précise de la composante biologique.

Même s'il ne faut pas oublier que beaucoup d'organismes du sol sont responsables de maladies ou de dégâts occasionnés aux cultures, les êtres vivants du sol sont à l'origine de nombreuses fonctions dans les sols agricoles, ces fonctions étant elles-mêmes à l'origine des services éco-systémiques rendus. Sans prétendre à l'exhaustivité, on peut citer les fonctions suivantes qui sont particulièrement importantes pour la gestion de la fertilité des sols.

**Ils sont le principal moteur du cycle des matières organiques du sol (MOS).** Les organismes qui appartiennent à la méso et à la macrofaune du sol apparaissent à de très nombreuses étapes de ce cycle, de la dégradation des résidus de culture à la régulation de la biomasse fongique. Les microorganismes sont seuls capables d'effectuer, grâce à leurs enzymes, les transformations biogéochimiques nécessaires à l'humification (transformation de la matière organique en humus) et à la minéralisation (décomposition des macromolécules organiques en éléments minéraux simples).

**La fixation de l'azote atmosphérique et autres symbioses mutualistes avec les racines des cultures.** La fixation peut être due à des bactéries vivant librement dans le sol ou à des bactéries vivant en symbiose avec les légumineuses (rhizobium). Par ailleurs, la plupart des plantes peuvent établir des relations symbiotiques avec une catégorie particulière de champignons, les mycorhizes. Dans l'association, ces dernières améliorent l'efficacité de prélèvement des nutriments, dont le phosphore par exemple (Gianinazzi *et al.*, 2010).

**La formation et la stabilisation de la structure des sols.** Les organismes vivants dans le sol agissent sur sa composante physique. L'exemple le plus connu est celui des vers de terre qui, par leur activité fousseuse créent de la porosité

(Capowiez et al., 2009). Mais les microorganismes ont aussi une action sur la stabilisation de la structure, en accroissant la capacité des agrégats du sol à résister à l'action dispersante de l'eau. Ainsi par exemple, le réseau mycélien des champignons du sol y contribue en agrégeant les particules minérales qui constituent les agrégats.

**La protection des cultures contre les pathogènes et ravageurs du sol.** Plusieurs travaux suggèrent que la présence d'organismes du sol au voisinage des racines des plantes stimule leurs défenses naturelles contre des maladies ou contre des agresseurs. Ainsi on a montré que la présence de vers de terre améliorerait la résistance du riz (pluvial) aux attaques de nématodes (Blouin et al., 2005).

### **Gestion de la composante biologique**

Le principal facteur sur lequel jouer pour entretenir la composante biologique du sol est le stock de matière organique, principale ressource d'organismes qui sont pour la plupart hétérotrophes. Les MOS influençant également les propriétés physiques (stabilité structurale, stockage de l'eau) et chimiques (Capacité d'Échange Cationique) des sols, elles se retrouvent donc naturellement au cœur de gestion de la fertilité.

Les MOS sont constituées d'un mélange de divers composés allant des résidus de culture frais à des composés humiques relativement inertes dont le turn-over se mesure en millénaires. C'est donc un continuum de molécules carbonées allant de composés très facilement dégradables à des composés récalcitrants à la dégradation (Haynes, 2005). Pour simplifier disons qu'elles sont classiquement séparées en deux fractions distinctes : une fraction labile facilement biodégradable et une fraction stabilisée, l'humus.

Le stock de matière organique stable du sol (d'humus) résulte d'un bilan entre des entrées, qui dépendent de la quantité et de la qualité des restitutions organiques au sol et des sorties, qui résultent de la minéralisation c'est-à-dire de l'activité des micro-organismes du sol. Le dégagement de CO<sub>2</sub> résultant de la respiration des organismes vivants du sol et des plantes s'oppose ainsi, dans le cycle du carbone, à la fixation de gaz carbonique par la photosynthèse. L'étude de ce bilan revêt une importance considérable, non seulement pour l'étude de l'évolution du statut organique des sols cultivés (et donc nous l'avons dit de celle de la composante biologique), mais également pour apprécier la contribution de l'agriculture à l'évolution de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère.

Les produits organiques utilisés en agriculture sont extrêmement divers et leur contribution au stock d'humus est très variable (cette contribution est mesurée par le coefficient isohumique). Ainsi par exemple, le rendement en humus des produits organiques



issus de l'élevage varie beaucoup : la composition chimique et la qualité des fumiers dépendant du rapport litière/déjections et de l'âge du produit au moment de son enfouissement. Les produits provenant de l'extérieur de la ferme (compost d'ordures ménagères, boues de station d'épuration...) représentent aussi des apports organiques très variables.

Pour estimer l'évolution du stock d'humus du sol, on réalise un bilan humique, en considérant que la variation du stock résulte de la différence entre la quantité d'humus stable produit à partir des résidus organiques (par l'humification) et la quantité de substances humiques dégradées par minéralisation (proportionnelle au stock en place, dont le taux de disparition annuel est mesuré par le coefficient de minéralisation). Les paramètres de ce bilan dépendent du régime de restitution, du stock en place, du type de sol et du climat.

La richesse en humus d'un sol est ainsi le résultat d'un bilan entre (i) des pertes, qui sont liées aux conditions pédoclimatiques (humidité, température, aération, pH...) et à l'importance du stock en place (elles sont d'autant plus fortes que le stock est important) et (ii) du système de culture, qui détermine la nature et l'importance des restitutions (et des apports externes) de matière organique au sol. Si les deux termes de ce bilan restent constants pendant une longue période, le taux de matières organiques du sol se stabilise : il s'établit un équilibre entre les pertes par minéralisation et les apports par enfouissement de résidus végétaux et/ou épandage d'amendements organiques. Par conséquent, les apports nécessaires au maintien du stock en place sont fonction du stock de matières organiques déjà en place (ils devront être d'autant plus importants que ce stock est élevé), des conditions de sol et de climat (qui jouent sur l'intensité de la minéralisation) et de la nature des produits apportés (qui produisent plus ou moins d'humus).

Sur une période suffisamment longue on peut considérer que le stock d'humus du sol suit une cinétique du premier ordre. L'équation différentielle correspondante permet de calculer la dynamique d'évolution du stock (il croît si le bilan est excédentaire, décroît s'il est déficitaire, dans les deux cas de manière exponentielle). Ce modèle prévoit l'atteinte d'une valeur d'équilibre, que l'on peut calculer.

Pendant longtemps, l'apport de matières organiques a constitué le seul moyen d'entretenir les capacités nutritives du sol. C'est encore le cas en agriculture biologique ainsi que dans toutes les situations où la trésorerie des exploitations limite l'accès aux engrais minéraux. Cependant, même dans les systèmes de production où l'accès aux engrais de synthèse ne pose pas de problème, l'entretien organique des terres est indispensable en raison de son rôle positif non seulement sur l'activité biologique mais aussi sur de nombreuses propriétés du sol. Les décisions concernant l'entretien du stock de matière organique et, surtout, le niveau qu'il faut maintenir (ou vers lequel il faut tendre) doivent être

considérées spécifiquement pour chaque système de culture, chaque type de sol, chaque climat.

Les sols de France métropolitaine abritent un stock de carbone organique considérable évalué à 3,2 milliards de tonnes dans les 30 premiers centimètres. Ce stock de carbone est en baisse dans un certain nombre de régions (sols cultivés des Landes de Gascogne et du piémont pyrénéen, Beauce...), le plus souvent en raison de changements d'usage (spécialisation céréalière souvent synonyme d'abandon de l'élevage) ou de pratiques (remplacement des amendements organiques par la fertilisation minérale) qui se sont produits depuis quelques décennies (Antoni et al., 2011). Dans d'autres situations, il semble être stabilisé, voire être en légère augmentation.

### **La composante physique de la fertilité : la structure du sol**

Cette composante repose essentiellement sur la qualité de la structure et sa stabilité. La structure des sols cultivés se définit comme l'ensemble des caractères liés à la disposition spatiale des éléments qui constituent le sol ainsi qu'à la nature et à l'intensité des liaisons qui existent entre eux (Stengel, 1990). Ce concept désigne donc l'organisation de la phase solide du sol, à différents niveaux d'échelle. Le complémentaire de cette phase solide, la phase des vides, constitue la porosité du sol. On distingue la porosité texturale, liée à l'organisation des composants élémentaires du sol (argile, limons, sables) de la porosité structurale, plus grossière, qui découle de la structure et varie au cours du temps.

La structure du sol affecte la plupart des processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent dans le sol. Ainsi, la structure des premiers centimètres de sol détermine le partage des eaux entre infiltration et ruissellement. Variable centrale des propriétés de transferts, elle détermine en effet l'évolution des paramètres environnementaux essentiels à la vie : température, humidité et oxygénation. La structure du sol joue donc un rôle majeur sur la nature et l'activité des organismes vivant dans le sol et, indirectement, sur le cycle de l'azote, du carbone et des éléments minéraux. Par ailleurs, la qualité de la structure du sol détermine les conditions dans lesquelles vont se dérouler la germination et la levée puis la croissance et le fonctionnement des racines (et donc l'efficacité de prélèvement des ressources par les plantes).

### **Gestion de la composante physique : maîtriser le tassement et raisonner le choix du mode de travail (ou de non travail) du sol**

Gérer la structure du sol c'est d'abord éviter de la dégrader. Le tassement résulte de l'application de contraintes sur le sol par les pneumatiques des engins agricoles. Cela entraîne une réduction de



la porosité structurale si la circulation des engins a lieu en conditions humides. Le tassement perturbe la croissance et le fonctionnement des racines et donc l'alimentation en eau et en éléments minéraux des plantes. Il modifie le fonctionnement biologique du sol et la circulation des fluides. Un sol tassé est donc moins favorable au fonctionnement des plantes. Il y a aussi des conséquences sur l'impact environnemental de l'agriculture (un sol tassé favorise la dénitrification, l'érosion). L'intensité du tassement dépend des caractéristiques intrinsèques du sol (de ses propriétés mécaniques) mais également de celle des engins agricoles (charge sur essieu, largeur d'appui au sol), de la teneur en eau du sol et de son état structural au moment du passage de la roue. À l'échelle de la parcelle cultivée, l'intensité de la dégradation de la structure par le tassement dépend également de la proportion de la surface de la parcelle qui est roulée. Cette proportion est liée à la largeur de travail des outils et à leurs règles d'emploi.

Parmi l'ensemble des techniques culturales, le travail du sol a un statut particulier vis-à-vis de l'évolution des états de la parcelle cultivée et de leurs conséquences sur la production végétale et l'environnement car cette opération affecte l'ensemble des composantes de l'état du profil (physique, chimique et biologique). En effet, le travail du sol modifie la structure. Indirectement, il affecte donc le fonctionnement des racines et par conséquent la capacité des plantes à prélever les éléments minéraux. L'état structural joue aussi sur la plupart des processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent dans le profil cultural (cycle des éléments minéraux et du carbone, devenir des résidus de culture, transferts d'eau et des substances qui y sont dissoutes). Mais, au rôle indirect du travail du sol sur les processus biophysiques via les modifications de la structure qu'il induit, s'ajoute un rôle direct sur les autres composantes de l'état de la parcelle cultivée. La localisation de la matière organique, celle de certains pathogènes, celle des éléments minéraux ou encore des graines d'adventices dépendent pour une large part du mode de travail du sol. En particulier, le labour, par l'importance du volume de terre concerné et par l'inversion des horizons qu'il entraîne, est la technique dont l'impact sur ces composantes est le plus important. La charrue retourne le sol et le déplace latéralement. Cette action, qui concerne l'ensemble de la couche travaillée, a également des effets sur les autres composantes de l'état du sol que sa seule structure (répartition des graines d'adventices, des éléments minéraux de la matière organique...).

La fragmentation par les outils de travail du sol et la fissuration par les agents naturels (racines, alternances gel-dégel, humectation dessiccation) contribuent à la régénération de l'état structural. Ces différents phénomènes augmentent la porosité structurale et diminuent le calibre des zones tassées.



L'observation de la structure du sol est un préalable nécessaire à la prise de décision. Elle permet de relier l'état structural du sol aux caractéristiques des opérations culturales antérieures et aux conditions dans lesquelles elles ont été pratiquées. On en déduit éventuellement la nécessité de corriger les états, s'ils sont jugés défavorables, de changer les pratiques si elles dégradent la structure. Mais cette décision tient aussi compte de nombreuses autres contraintes : climat à venir, nature de la culture, présence éventuelle d'un couvert, organisation du travail, équipement... autant d'éléments qui déterminent le temps disponible pour réaliser les opérations culturales et qui font que, de plus en plus, on observe une diversité des manières de gérer la composante physique des parcelles cultivées. En particulier, la nécessité de diminuer les temps de travaux dans des exploitations dont la rentabilité dépend de plus en plus de la baisse de leurs charges de structure, ou le souci de réduire la consommation d'énergie fossile, amènent certains agriculteurs à simplifier leur préparation (tout particulièrement en ne labourant plus), voire à supprimer toute opération de travail du sol (semis direct). Ces méthodes simplifiées de préparation des parcelles sont également le moyen de faire face à un certain nombre de problèmes agronomiques et environnementaux (érosion, tassements profonds, préservation de l'eau dans le sol), surtout si elles sont couplées à une couverture systématique du sol (maintien d'un mulch végétal, vivant ou mort (Carof et al., 2007). Elles sont aussi le moyen de favoriser l'activité biologique (Kladivko, 2001). Tous ces effets ne sont cependant pas systématiques : l'efficacité vis-à-vis de l'érosion dépend de la couverture du sol, l'impact sur la composante biologique du type d'organisme considéré, le résultat sur le tassement de l'humidité du sol au moment des travaux. On peut également se poser la question de l'effet sur l'émission d'oxyde nitreux, gaz à effet de serre, plutôt favorisée (mais pas systématiquement) par le non labour. Pour conclure, il faut souligner que, tout comme les préparations du sol conventionnelles, les préparations simplifiées comportent une part de risque qu'il faut savoir maîtriser... Ainsi, même si la part des surfaces agricoles régulièrement labourées reste, dans les pays tempérés, considérable ; même si l'accumulation des références sur les effets du non labour est importante (le premier réseau d'essais de longue durée a été mis en place dans les années 1970, conjointement par l'INRA et l'ITCF, devenu Arvalis Institut du végétal), la poursuite des recherches sur ce thème reste indispensable. Il est en effet nécessaire de construire les outils permettant de faire la part des bénéfices et des coûts réels de la suppression du labour pour l'agriculteur, pour le sol, pour la biodiversité et pour l'environnement, alors même que la diversité des solutions techniques adoptées (et des types de sol auxquels elles sont appliquées) est très grande.



## Conclusion

De nombreuses interactions existent entre les composantes de la fertilité des sols que nous avons considérées ici. Par exemple, la qualité de la structure détermine la nature des organismes vivants qui peuplent le sol et, nous l'avons mentionné, ces organismes ont en retour un rôle (positif) sur l'entretien et l'amélioration de la structure.

Les méthodes de gestion du sol doivent être raisonnées de manière à prendre en compte ces interactions dans leur ensemble car de leur bon fonctionnement dépend la capacité des sols agricoles à assurer les services non seulement de support de la production (fonctionnement des racines et croissance des plantes, germination des semences, levée des cultures...) mais aussi environnementaux (pouvoir épurateur, régulation de l'effet de serre, infiltration et rétention de l'eau) et touchant à la biodiversité (qu'elle soit ou non utile à l'agriculteur).

Mais cette gestion doit aussi prendre en compte des impératifs de viabilité des exploitations, qui dépendent de beaucoup de contraintes. Ainsi, les agriculteurs doivent en permanence faire des compromis entre ce qui est bon pour le sol et ce qui rapporte à court terme. Varier les cultures de la rotation par exemple, permet de diversifier la nature des restitutions organiques et, dans certains cas, d'accroître les apports ; mais, souvent, seules quelques cultures sont, dans une région donnée, très rémunératrices, ce qui incite à la simplification des rotations... au détriment du bilan humique.

Une partie du revenu des agriculteurs dépendant des aides européennes, l'éco conditionnalité est un moyen pour inciter les agriculteurs à trancher dans le sens de pratiques plus vertueuses pour l'environnement ou la préservation de la fertilité. Concernant ce dernier point, elles devraient encourager plus fermement les agriculteurs à veiller à l'entretien du sol dans toutes ses composantes.

Le sol est une ressource essentielle pour la sécurité alimentaire future de nos sociétés qui devrait non plus être considérée uniquement comme un bien privé (que l'agriculteur doit gérer « en bon père de famille »), mais comme un bien commun dont la société doit, en solidarité avec les agriculteurs, se préoccuper de préserver la capacité à produire. ■

## Références

Antoni V., Arrouays D., Bispo A., Brossard M., Le Bas C., Stengel P., Villanneau E., 2011. Synthèse sur l'état des sols de France. Dossier réalisé dans le cadre du GIS Sol.

- Blouin, M., Y. Zuily-Fodil, A.-T. Pham-Thi, D. Laffray, G. Reversat, A. Pando, J. Tondoh, and P. Lavelle. 2005. Belowground organism activities affect plant aboveground phenotype, including plant tolerance to parasites. *Ecol. Lett.* 8:202-208.
- Capowiez, Y., Cadoux S., Bouchand P., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H. 2009. Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment. *Soil Biology and Biochemistry* 41(4): 711-717.
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J., 2007. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system (II): competition for light and nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development*, 27 (4), 357-365.
- Doré T., Le Bail M., Ney, B., Roger-Estrade J. (coordonateurs), 2006. *L'Agronomie aujourd'hui. Coordination de la partie 3 de l'ouvrage « Effets des systèmes de culture sur les états du milieu cultivé. »*. Quae Éditions, Paris.
- Ettema C.H., Wardle D.A., 2002. Spatial soil ecology. *TRENDS in Ecology & Evolution* Vol. 17 No.4 April 2002.
- Gianinazzi, S., A. Gollotte, Binet M.N., van Tuinen D., Redecker D., and Wipf D., 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*: 1-12.
- Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J., Morel J.L., (éditeurs), 2011. *Sols et environnement ; Cours, exercices corrigés et études de cas*. Collection: Sciences Sup, Dunod, Paris. 2<sup>e</sup> édition. 896 pp.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2010. *Le sol vivant: Bases de pédologie - Biologie des sols*. PPUR Presses Polytechniques, Zurich, Suisse. 817p.
- Haynes, R.J. 2005. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. *Advances in Agronomy* 85:221-268.
- Kladivko, E.J. 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil & Tillage Research* 61:61-76.
- Médiène S., Valantin-Morison M., Sarthou J.P., de Tourdonnet S., Gosme M., Bertrand M., Roger-Estrade J., Aubertot J.N., Rusch A., Motisi N., Pelosi C., Doré T., 2011. Agroecosystem management and biotic interactions: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31, 491-514. Doi 10.1007/s13593-011-0009-1.
- Sebillotte M., L'agronome face à la notion de fertilité, *Natures Sciences Sociétés*, n° 01-02, 1993.
- Stengel P., 1990. Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In: « La structure des sols et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur » (J. Boiffin, A. Marin-Laflèche, eds). *Les colloques de l'INRA*, 53, Versailles, pp 15-36.

