

Rôle des vers de terre et des termites pour la restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux.

Eric Blanchart¹ et Pascal Jouquet²

¹ IRD, UMR 210 Eco&Sols (Montpellier SupAgro, CIRAD, INRA, IRD), 2 Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 1, France ; eric.blanchart@ird.fr

² IRD, UMR 211 BIOEMCO, Equipe Transferts, Centre IRD Bondy, 32 Avenue H. Varagnat, 93143 Bondy Cedex, France ; pascal.jouquet@ird.fr

Résumé

Les invertébrés de la macrofaune du sol, comme les vers de terre et les termites, jouent un rôle clé dans le fonctionnement des sols. Ils décomposent la litière et l'incorporent au sol, ils construisent et maintiennent la structure du sol en creusant des galeries et en modifiant l'agrégation du sol, ils contrôlent en partie la diversité et les activités microbiennes, ils protègent les plantes contre les maladies et les pathogènes. En modifiant l'agrégation et la porosité du sol, en décomposant la matière organique, ces organismes participent à l'infiltration et au stockage de l'eau dans les sols, au recyclage des nutriments, à la régulation du ruissellement de l'eau, au stockage du carbone. Ces processus sont à la base des services écosystémiques. Pourtant le rôle bénéfique de ces organismes dans la productivité des sols et la fourniture de services écosystémiques est encore mal connu et peu utilisé par les gestionnaires du sol (agriculteurs, etc.). Ils sont pourtant des indicateurs de la qualité des sols et doivent être considérés comme une ressource permettant de mieux gérer et améliorer la fourniture de services par les agro-écosystèmes tropicaux.

Mots-clés : Services écosystémiques, fertilité, érosion, compaction, réhabilitation, matière organique du sol, ingénierie écologique

Abstract

Invertebrates of soil macrofauna, such as earthworms and termites, are key organisms regarding soil functioning. They are involved in litter decomposition and incorporation in soil, they build and maintain soil structure through burrowing and modification of soil aggregation, they partly control microbial diversity and activities, and they protect plants against disease and pests. Doing this, they contribute to water infiltration and storage in soil, to nutrient recycling, to the regulation of water run-off, and to carbon sequestration. These ecosystem processes are at the roots of ecosystem services. Nevertheless, the beneficial roles of these ecosystem engineers in soil productivity and the supply of ecosystem services are still very poorly used by farmers and soil stakeholders. But they are relevant indicators of soil quality and should be considered as a resource potentially allowing a better soil management and promoting the furniture of ecosystem services by tropical agroecosystems.

Key words : Ecosystem services, fertility, erosion, compaction, restoration, soil organic matter, ecological engineering

1. Introduction

Une littérature scientifique croissante suggère que la régulation des cycles biogéochimiques majeurs par les invertébrés du sol pourrait être utilisée pour l'amélioration des services écosystémiques (voir notamment les synthèses de Lavelle et al., 2006 ; Decaëns et al., 2006 ; Barrios, 2007). Parmi les invertébrés du sol, les ingénieurs du sol (Jones et al., 1994) semblent jouer un rôle prédominant. Ils sont principalement, mais pas exclusivement, les vers de terre et les termites. Bien que moins répandus que ces deux groupes d'organismes, d'autres espèces peuvent jouer un rôle similaire dans la régulation des fonctions de l'écosystème (i.e., les bousiers en Afrique du Sud, Brown et al., 2010 ; les vers blancs (larves de Coléoptères Scarabéidae), Brown et al., 2001 ; Rabary et al., 2008 ; les fourmis, Folgarait, 1998 ; les diplopodes, Toyota et al., 2006). La reconnaissance croissante de leur importance dans la régulation des cycles biogéochimiques majeurs et dans le transfert de matière et d'énergie dans les écosystèmes conduit à suggérer le développement d'une activité d'ingénierie du sol comme une pierre angulaire pour la définition de pratiques agricoles plus durables (De Goede & Brussaard, 2002). Plusieurs articles majeurs ont été publiés au cours des 20 dernières années sur le potentiel des ingénieurs du sol pour la réhabilitation des sols. Une synthèse contemporaine sur l'utilisation des ingénieurs du sol pour restaurer des écosystèmes dégradés, mettant à jour la littérature croissante est maintenant appropriée. Dans ce chapitre, nous présentons les principales fonctions réalisées par ces organismes, puis nous révisons les méthodes développées pour favoriser l'activité des ingénieurs du sol en identifiant les obstacles entravant le développement de recherches sur le sujet. Enfin, nous donnons des exemples d'utilisation de l'activité de vers de terre et de termites pour la réhabilitation de la qualité et du fonctionnement des sols à travers certaines études de cas. En conclusion, nous considérons les points de recherche qui sont à développer pour permettre l'innovation de pratiques modernes et durables de réhabilitation d'écosystèmes dégradés.

2. Principales fonctions des ingénieurs du sol

En plus d'agir comme des détritivores, les vers de terre et les termites modifient la disponibilité des ressources pour les autres espèces, à travers la création de biopores et d'agrégats biogéniques (Lavelle et al., 1997 ; Jouquet et al., 2006). Ils sont impliqués dans la plupart des fonctions clés du sol, telles que la décomposition des résidus organiques à la surface du sol et de la matière organique du sol, le recyclage des nutriments, l'infiltration de l'eau et sa rétention dans le sol, l'érosion du sol, la croissance des plantes, les émissions de gaz à effet de serre, etc. (Lavelle and Spain, 2001). C'est pourquoi on considère généralement que les ingénieurs du sol sont des composantes essentielles à la qualité du sol et leurs abondance et diversité ont été proposées comme des bioindicateurs de la santé des écosystèmes (Paoletti, 1999, Ruiz et al., 2011) ou pour estimer le niveau de réhabilitation de sites miniers (Boyer & Wratten, 2010). Les recherches récentes sur les processus par lesquels les ingénieurs du sol et notamment les vers de terre influencent la croissance végétale en zone tropicale ont permis d'accroître considérablement notre connaissance du fonctionnement du sol. Les vers agissent sur les plantes en libérant plus de nutriments disponibles pour les plantes (N et P minéral), en modifiant les communautés de microorganismes et en stimulant leur activité, en contrôlant les

agents des maladies, en libérant des phytohormones ou encore en stimulant les symbioses entre plantes et microorganismes (rhizobium, mycorhizes) (Barot et al., 2007, Chapuis-Lardy et al., 2011 ; Bernard et al., 2012). La présence de vers de terre peut aussi modifier la germination des graines, la démographie et les communautés de plantes (Laossi et al., 2010a ; 2011) et modifier l'allocation des ressources chez les plantes (Jana et al., 2010). Mais les plantes ne répondent pas toutes de la même façon à la présence de vers de terre. Tout dépend des espèces de vers et de plantes impliquées ou des caractéristiques du sol (Laossi et al., 2010b). Par exemple, une expérience récente a montré que les variétés rustiques répondaient mieux à la présence de vers de terre que les variétés sélectionnées par des méthodes modernes (Noguera et al., 2010).

3. Méthodes pour relancer l'activité des ingénieurs du sol

Trois stratégies existent pour relancer l'activité des ingénieurs de l'écosystème au champ. Une méthode directe consiste à introduire les ingénieurs du sol *in situ*. Cette méthode ne concerne que les vers de terre puisque l'élevage des termites est difficile, lent, voire impossible, notamment pour les espèces de termites humivores et champignonnistes (Jouquet et al., 2011a). L'introduction de vers de terre dans les sols dégradés est souvent confrontée à des conditions de sol inhospitalières (e.g. faible humidité du sol, faibles ressources nutritives, fortes concentrations en polluants...). En conséquence, la sélection d'espèces de vers de terre ou de groupes écologiques appropriés est capitale pour assurer l'établissement réussi et leur diffusion dans l'écosystème. Par exemple, en fonction de la ressource organique disponible, des espèces endogées peuvent être préférées aux espèces anéciques qui nécessitent un établissement préalable de plantes (fournissant la litière) ou l'application d'amendements organiques (Langmaack et al., 2002). Dans un sol très acide, des espèces acido-tolérantes doivent être préférées à des espèces moins tolérantes. Différentes méthodes ont été décrites pour optimiser l'élevage des vers de terre, leur inoculation, et l'établissement de populations saines *in situ* (Butt et al., 1995). Dans certaines situations, la revégétalisation de sites dégradés peut être tentée avant l'introduction de vers de terre afin de garantir l'alimentation des vers de terre (Ganihar, 2003). Malgré tout, le principal obstacle gênant l'utilisation de cette méthode est notre difficulté à obtenir suffisamment d'individus de vers de terre. Excepté les quelques espèces disponibles sur le marché, comme appâts pour la pêche et ceux utilisés en lombriculture, la plupart des espèces trouvées dans les champs ne sont pas commercialisées et nécessitent la mise en place d'élevage en culture. Ce processus n'est pas toujours faisable et peut ralentir les programmes de réhabilitation. Pour cette raison, et parce qu'elles tolèrent une plus grande étendue de conditions physicochimiques et climatiques que les espèces natives, les espèces exotiques et parfois invasives sont généralement préférées (e.g., Garcia & Fragoso, 2002 ; Ganihar, 2003 ; Blanchart et al., 2004a ; Noguera et al., 2011), ce qui peut entraîner d'autres problèmes environnementaux comme une diminution de la biodiversité locale et une altération des fonctions de l'écosystème (Chauvel et al., 1999 ; Gonzalez et al., 2006).

Le développement des vers de terre et des termites peut aussi être favorisé par des méthodes indirectes. L'intensification agricole, comme le travail du sol et les produits phytosanitaires, et la simplification du paysage entraînent généralement une perte de biodiversité (Stoate et al., 2001 ; Benton et al., 2003 ; Foley et al., 2005). En revanche, des pratiques agricoles plus durables d'intensification écologique

(McGarry et al., 2000) et une plus grande complexité du paysage (Flohe et al., 2011) sont des conditions plus favorables pour accroître l'abondance et la diversité des vers de terre, des termites et d'autres invertébrés du sol. Le développement de la macrofaune du sol étant souvent limité par la quantité des ressources disponibles, l'application de mulch ou d'amendements organiques permet généralement un développement d'espèces locales de vers de terre et de termites (Blanchart et al., 2006). Malgré tout, le succès de cette approche reste dépendant de la qualité des ressources organiques. Certaines études concluent également que l'absence ou la réduction du travail du sol sont préférées à des pratiques culturales plus intensives (Blanchart et al., 2006, 2007). Ces méthodes étant indirectes, leur efficacité dépend de nombreux paramètres non contrôlés, tels que le climat et l'activité d'autres organismes qui pourraient ralentir le développement des ingénieurs du sol par des relations de compétition et/ou de prédation.

4. Restauration de la productivité des agrosystèmes

Dans cette partie, nous présentons quelques études de cas traitant de l'utilisation de vers de terre et de termites dans la restauration de la productivité des agrosystèmes ou dans la réhabilitation de terres dégradées. Les dégradations physiques, chimiques, biologiques sont très répandues et résultent généralement de l'intensification de pratiques culturales (travail du sol trop intense, manque d'apports de matière organique, etc.), d'une gestion non durable de la fertilisation ou d'une exploitation non durable des ressources.

4.1. Restauration des stocks de matière organique

Les pratiques durables mises en œuvre dans certains systèmes de culture permettent à la fois une augmentation des stocks de carbone ou de matière organique des sols et une augmentation des densités, biomasses et diversités des ingénieurs du sol. Au Bénin, l'utilisation de la plante de couverture *Mucuna pruriens* var. *utilis* en interculture de maïs permet au bout de 11 ans d'accroître considérablement les stocks de carbone dans l'horizon 0-40 cm de sol (41,4 MgC.ha⁻¹ contre 24,2 MgC.ha⁻¹ pour les traitements sans *Mucuna*), les biomasses de macrofaune (40,6 g.m⁻² contre 10,1 g.m⁻²), les densités de vers de terre (579 ind.m⁻² contre 121 ind.m⁻²) et de termites (6747 ind.m⁻² contre 2632 ind.m⁻²) et les rendements en grain de maïs (3500 kg.ha⁻¹ contre 200 kg.ha⁻¹) (Barthès et al., 2004 ; Blanchart et al., 2006). Bien que les relations de cause à effet ne soient pas démontrées, on peut penser que la plus grande abondance d'ingénieurs du sol a un impact sur la productivité notamment par une modification du régime hydrique du sol, la mise à disposition de nutriments ou encore la protection physique de la matière organique dans les agrégats. Au Brésil, les techniques de semis direct sous couverture végétale SCV permettent également, dans la région des Cerrados, d'améliorer les propriétés des sols, en comparaison avec des systèmes labourés : augmentation des stocks de carbone (83,6 MgC.ha⁻¹ dans des systèmes SCV de 13 ans contre 67,8 MgC.ha⁻¹ sous labour), des biomasses de macrofaune (38 g.m⁻² contre 0,8 g.m⁻²) et notamment des biomasses de larves de Coléoptères (34 g.m⁻² contre 0 g.m⁻²) pour lesquelles on observe une très bonne corrélation avec les stocks de carbone et donc avec l'ancienneté du système SCV (Blanchart et al., 2007). Si une corrélation positive entre biomasse ou densité d'ingénieurs et stocks de carbone est souvent mise en évidence, on peut se poser la question du rôle effectif des ingénieurs du sol sur ce stockage de carbone. Les processus mis en œuvre par les

ingénieurs du sol peuvent être à la fois une accélération de la décomposition de la matière organique sur le court terme (Coq et al., 2007) et une protection physique dans les agrégats sur le long terme (Lavelle et al., 1998 ; Ngo et al., 2011).

4.2. Restauration de la fertilité

Très peu d'études mettent en œuvre une manipulation des ingénieurs du sol pour une réhabilitation de la fertilité du sol. L'exemple le plus remarquable en zone tropicale est celui des plantations de thé en Inde du Sud où l'incorporation simultanée de vers de terre, de résidus de taille de thé et de fumier dans des fossés creusés entre les rangs de théiers a permis une augmentation des rendements (production de feuilles vertes) atteignant 275% (supérieure à l'augmentation observée avec des engrais seuls) et des bénéfices de l'ordre de 5.500 \$ par hectare en 1991 (Senapati et al., 1999). Cette réussite a permis un fort développement de cette technique en Inde. Ce système montre que l'introduction des ingénieurs du sol et le déclenchement de leur activité positive n'a pu se faire que conjointement avec un apport de matière organique.

4.3. Réhabilitation des sols compactés

Les études menées sur les vers de terre endogés en zone tropicale montrent qu'il est possible de distinguer deux groupes fonctionnels de vers de terre : les compactants et les décompactants (Blanchart et al., 1997). Les compactants sont généralement des vers de terre de taille moyenne à grande qui produisent des biostructures de grande taille dont l'accumulation entraîne une augmentation de la densité apparente d'un sol. Dans certaines situations extrêmes, le développement de ces vers de terre peut entraîner une imperméabilisation du sol avec des phénomènes d'anoxie comme cela a pu être observé en Amazonie (Chauvel et al., 1999 ; Barros et al., 2001). Vis-à-vis de l'érosion, ces vers de terre exercent deux actions qui sont (i) de produire des turricules stables à la surface du sol et ainsi d'augmenter la rugosité de surface et (ii) de créer des galeries de grande taille qui permettent une infiltration rapide de l'eau mais pas sa rétention. Ces deux fonctions sont un frein au ruissellement et à l'érosion (Blanchart et al., 2004). Les vers de terre décompactants, généralement représentés par des vers de terre de petite taille, produisent des turricules de petite taille dont l'agencement résulte en une diminution de la densité apparente du sol. Les capacités de rétention en eau sont accrues mais le risque d'érosion est augmenté, les turricules produits à la surface du sol étant labiles et pouvant aisément entraîner la formation d'une croûte imperméable à la surface du sol lors des fortes pluies (Roose, 1976). Quoiqu'il en soit, les recherches menées sur cette question semblent confirmer que la présence simultanée de groupes fonctionnels variés (compactants et décompactants) est le gage d'un bon fonctionnement du sol et donc de l'écosystème.

La capacité des termites à se développer dans des environnements difficiles et à favoriser l'infiltration de l'eau dans des sols encroutés, et donc à réhabiliter les sols et à régénérer le couvert végétal a été clairement démontré en Afrique et en Asie (Mando et al., 1996 ; Mando and Brussaard, 1999 ; Pardeshi & Prusty, 2010). Dans ces études, l'application de mulch ou de matière organique dans ou sur le sol comme dans le cas des systèmes agricoles et forestiers « zai » (Roose et al., 1999) déclenche l'activité des termites qui créent ensuite des galeries ouvertes à travers la croûte à la surface du sol. Il en résulte une augmentation de la conductivité hydraulique du sol et de la rétention en eau et une diminution de la densité

apparente du sol. Le changement des caractéristiques du sol sous l'activité des termites est suffisant pour créer les conditions nécessaires au développement de la végétation naturelle ou à une production agricole sur des sols préalablement dégradés. Le principal obstacle à ces techniques est qu'elles demandent un important travail humain. Par exemple, la technique zaï nécessite 300 heures.ha⁻¹ de travail difficile, la disponibilité et le transport de 3000 kg.ha⁻¹ de substrats organiques (Roose et al., 1999). Un autre inconvénient de cette méthode réside dans la difficulté à contrôler la décomposition de l'amendement organique et un lessivage potentiel des nutriments minéraux peut apparaître (Fatondji et al., 2009).

4.4. Réhabilitation des sols érodés

L'installation de cultures maraîchères sur les vertisols magnésio-sodiques du Sud-est de la Martinique (Antilles) entraîne en quelques années de fortes pertes en terre par érosion, en raison d'un déclin rapide des stocks de matière organique. La restauration des propriétés du sol peut se faire, sur le moyen terme en réinstallant des prairies irriguées et fertilisées qui permettent une restauration des stocks de matière organique et des communautés de vers de terre. Des études expérimentales, au champ, sur 5 ans, ont permis de montrer que les vers de terre, malgré des biomasses très importantes (plus d'une tonne.ha⁻¹) ne jouaient qu'un rôle tout à fait mineur sur la restauration des propriétés du sol, à la différence des racines de Graminées (Blanchart et al., 2004b).

Dans le nord du Vietnam, la production d'agrégats biogéniques en surface des sols par les vers de terre et les termites influence de façon significative les propriétés hydro-pédologiques des sols. La forte stabilité structurale des turricules produits en surface des sols par une espèce anécique, *Amyntas khami*, entraîne une augmentation de la rugosité des sols, favorisant ainsi l'infiltration de l'eau et réduisant l'exportation de sol et nutriments dans les jachères (Jouquet et al., 2008a,b). A l'inverse, les turricules granulaires d'une espèce de ver de terre endogée, *Metaphire posthuma*, et les placages de termites, constitués d'agrégats de petite taille, apparaissent comme moins stables que les agrégats de sol du milieu environnant. Ils se fragmentent rapidement lors d'évènements pluvieux et sont entraînés avec l'eau de ruissellement, favorisant alors la formation de croûte structurale en surface des sols et l'exportation de sédiments et nutriments (N et P).

La notion de groupe fonctionnel prend ici toute son importance et il apparaît que toutes les espèces n'ont pas le même effet sur l'érosion des sols : certaines espèces, ou groupes fonctionnels, favorisent l'infiltration de l'eau et réduisent le détachement des sols et l'exportation de matière, alors que d'autres ont des effets contraires.

4.5. Réhabilitation de la productivité par utilisation de lombricompost

De nombreuses études ont montré une influence positive des amendements organiques sur la fertilité des sols, les rendements et les services écosystémiques (Herencia et al., 2008; Gomiero et al., 2008). Un processus intéressant pour améliorer la qualité des amendements organiques est le lombricompostage qui implique l'activité de vers de terre épigés (Edwards et al., 2004). Au cours des deux dernières décennies, la lombriculture a été appliquée pour la gestion de nombreux types de déchets et de boues, pour les convertir en un substrat destiné à améliorer la fertilité des terres. De façon surprenante, peu de recherches ont été menées sur l'utilisation de ce substrat pour la restauration du sol. Des études récentes menées au Nord du Vietnam tendent à montrer que le lombricompost pourrait être intéressant

pour réhabiliter les sols dégradés par l'érosion (Jouquet et al., 2011b ; Ngo et al., 2011). L'épandage de lombricompost peut augmenter la croissance des plantes de façon similaire à celle mesurée lorsque des fertilisants chimiques sont utilisés, mais les propriétés du sol sont nettement améliorées (pH, teneur en matière organique, ammonium et capacité d'échange cationique plus élevés) et les pertes en nutriments minéraux considérablement réduites (Jouquet et al., 2011b). Pourtant, malgré qu'il soit apparemment plus intéressant que le compost pour la réhabilitation du sol, le lombricompost peut devenir moins efficace en présence du ver de terre exotique *Dichogaster bolau* (Jouquet et al., 2010). En conséquence, de nouvelles recherches doivent être entreprises sur cette question pour tester, *in situ*, et dans d'autres situations pédo-climatiques, la valeur de ce substrat pour la restauration de la qualité du sol.

5. Vers une restauration du sol plus intensive

L'abondante littérature sur le rôle des ingénieurs du sol montre qu'ils n'affectent pas toujours de façon significative le fonctionnement du sol, ni toujours dans le même sens et que tous les ingénieurs du sol ne sont pas forcément bénéfiques pour le fonctionnement du sol. Il est donc probable que certaines espèces doivent être préférées à d'autres si l'objectif est de réhabiliter le fonctionnement ou la productivité du sol.

Une meilleure compréhension de l'influence de la complexité des paysages pourrait être une approche prometteuse. Augmenter l'hétérogénéité dans les écosystèmes pourrait être une approche intéressante pour maintenir des populations de vers de terre au champ qui pourraient ensuite diffuser dans tout l'écosystème.

Une récente étude suggère également qu'un rétablissement plus rapide des populations d'ingénieurs du sol pourrait être obtenu par l'utilisation de substrats chimiques ou organiques qui pourraient agir comme attractant pour les ingénieurs du sol (Zirbes et al., 2011).

De façon surprenante, alors qu'il existe une abondante littérature soulignant les rôles clefs que jouent les espèces ingénieurs du sol dans le fonctionnement des écosystèmes, leur utilisation pour la réhabilitation des écosystèmes dégradés reste inexplorée. Comme nous avons essayé de le mettre en lumière dans ce chapitre, les raisons en sont multiples. Parmi elles, le fait qu'il est difficile, voire impossible dans certaines situations, de séparer le rôle des ingénieurs du sol des effets d'autres variables telles que le changement d'utilisation des pratiques culturales, l'apport de résidus organiques, etc...

De l'ensemble des exemples donnés, il apparaît également que la grande majorité des travaux réalisés portent sur les vers de terre et que le rôle des termites a été jusqu'à présent très peu étudié. Une explication réside dans notre difficulté à contrôler et utiliser les termites par comparaison aux vers de terre plus facilement manipulables, mais une autre raison est peut-être également la mauvaise réputation des termites, perçus bien souvent comme ravageurs de culture. De même, l'activité des fourmis, comme ingénieurs du sol, reste inexploitée alors que leur activité de creusement peut, localement et dans certaines circonstances, être équivalente ou supérieure à celles des termites et vers de terre.

Pour conclure, une meilleure appréciation des rôles des ingénieurs du sol et le développement de techniques innovantes, telle que l'utilisation de molécules attractives permettant d'orienter le déplacement des vers de terre ou l'utilisation des variétés de plantes adaptées aux populations de vers de terre, doivent se développer

à la fois pour assurer une meilleure productivité agricole mais aussi pour favoriser les fonctions écologiques permettant la réhabilitation d'écosystèmes dégradés.

References

- Barot S., Ugolini A. & Bekal Brikci F. 2007. When do soil decomposers and ecosystem engineers enhance plant production? *Functional Ecology*, 21: 1-10.
- Barrios E. 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*, 64: 269–285.
- Barros E., Curmi P., Hallaire V., Chauvel A. & Lavelle P. 2001. The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an oxisol in the process of forest to pasture conversion. *Geoderma*, 100: 193-213.
- Barthès B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Lesaint S., Oliver R., Mariotti A. & Feller C. 2004. Effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on soil carbon in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. *Soil Use and Management*, 20: 231-239.
- Benton T.G., Vickery J.A. & Wilson J.D. 2003. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution*, 18: 182-188.
- Bernard L., Chapuis-Lardy L., Razafimbelo T., Razafindrakoto M., Pablo A.L., Legname E., Poulain J., Brûls T., O'Donohue M., Brauman A., Chotte J.L. & Blanchart E. 2012. Endogeic earthworms shape bacterial functional communities and affect organic matter mineralization in a tropical soil. *The ISME Journal*, 6: 213-222.
- Blanchart E., Lavelle P., Braudeau E., Le Bissonnais Y. & Valentin C. 1997. Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire. *Soil Biology and Biochemistry*, 29: 431-439.
- Blanchart E., Albrecht A., Alegre J., Duboisset A., Villenave C., Pashanasi B., Lavelle P. & Brussaard L. 1999. Effects of earthworms on soil structure and physical properties. In Lavelle P., Brussaard L. & Hendrix P. (eds) *Earthworm management in tropical agroecosystems*. CABI Publishing, 149-172.
- Blanchart E., Albrecht A., Brown G.G., Decaëns T., Duboisset A., Lavelle P., Mariani L. & Roose E. 2004a. Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion: a review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104: 303-315.
- Blanchart E., Albrecht A., Chevallier T. & Hartmann C. 2004b. The respective roles of biota (roots and earthworms) in the restoration of physical properties in vertisol under a *Digitaria decumbens* pasture (Martinique). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103: 343-355.
- Blanchart E., Villenave C., Viallatoux A., Barthès B., Girardin C., Azontonde A. & Feller C. 2006. Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal of Soil Biology*, 42: 136-144.
- Blanchart E., Bernoux M., Sarda X., Siqueira Neto M., Cerri C.C., Piccolo M., Douzet J.M., Scopel E. & Feller C. 2007. Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 72: 81-87.
- Bottinelli, N., Henry-des-Tureaux T., Hallaire V., Mathieu J., Benard Y., Duc Tran T. & Jouquet P. 2010. Earthworms accelerate soil porosity turnover under watering conditions. *Geoderma*, 156: 43-47.
- Boyer S. & Wratten S.D. 2010. The potential of earthworms to restore ecosystem services after open-pit mining – A review. *Basic and Applied Ecology*, 11: 196-203.
- Brown G.G., Pasini A., Benito N.P., de Aquino A.M. & Correia M.E.F. 2001. Diversity and functional role of soil macrofauna communities in Brazilian no-tillage agroecosystems: a preliminary analysis. International Symposium on Managing Biodiversity in Agricultural Ecosystems. Montreal, Canada, 8-10 novembre 2001.
- Brown G.G., Pashanasi B., Villenave C., Patron J.C., Senapati B.K., Giri S., Barois I., Lavelle P., Blanchart E., Blakemore R.J., Spain A.V. & Boyer J. 1999. Effects of earthworms on plant production in the tropics. In Lavelle P., Brussaard L. & Hendrix P. (eds) *Earthworm management in tropical agroecosystems*. CABI Publishing, 87-148.
- Brown J., Scholtz C.H., Janeau J-L., Grellier S. & Podwojewski P. 2010. Dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) can improve soil hydrological properties. *Applied Soil Ecology* 46: 9-16.
- Butt K.R., Frederickson J. & Morris R.M. 1995. An earthworm cultivation and soil inoculation technique for land restoration. *Ecological engineering*, 4: 1-9.
- Chapuis-Lardy L., Brauman A., Bernard L., Pablo A.L., Toucet J., Mano M.J., Weber L., Brunet D., Razafimbelo T., Chotte J.L. & Blanchart E. 2010. Effect of the endogeic earthworm *Pontoscolex*

- corethrurus* on the microbial structure and activity related to CO₂ and N₂O fluxes from a tropical soil (Madagascar). *Applied Soil Ecology*, 45: 201-208.
- Chauvel A., Grimaldi M., Barros E., Blanchart E., Desjardins T., Sarrazin M. & Lavelle P. 1999. Pasture damage by an Amazonian earthworm. *Nature*, 398: 32-33.
- Coq S., Barthès B.G., Oliver R., Rabary B. & Blanchart E. 2007. Earthworm activity affects soil aggregation and soil organic matter dynamics according to the quality and localization of crop residues – An experimental study (Madagascar). *Soil Biology and Biochemistry*, 39: 2119-2128.
- Decaëns T., Jiménez J.J., Gioiac C., Measey G.J. & Lavelle P. 2006. The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42: S23–S38.
- De Goede R.M.G. & Brussaard L. 2002. Soil zoology: an indispensable component of integrated ecosystem studies. *European Journal of Soil Biology*, 38: 1-6.
- Edwards C.A. & Arancon N. 2004. The use of earthworms in the breakdown of organic wastes to produce. In *Earthworm ecology*, Edwards C.A. (Ed.), Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 345-371.
- Fatondji D., Martius C., Biélders C.L., Koala S., Vlek P.L.G. & Zougmore R. 2009. Decomposition of organic amendment and nutrient release under the zai technique in the Sahel. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 85: 225-239.
- Flohre A., Fischer C., Aavik T., Bengtsson J., Berendse F., Bommarco R., Ceryngier P., Clement L.W., Dennis C., Eggers S., Emmerson M., Geiger F., Guerrero I., Hawro V., Inbchausti P., Lira J., Morales M.B., Onate J.J., Pärt T., Weisser W.W., Winqvist C., Thies C. & Tscharrnke T. 2011. Agricultural intensification and biodiversity partitioning in European landscapes comparing plants, carabids, and birds. *Ecological Applications*, 21: 1772-1781.
- Foley J.A., De Fries R., Asner GP, et al. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: 570–574.
- Folgarait P.J. 1998. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. *Biodiversity and Conservation*, 7: 1221-1244.
- Ganihar S.R. 2003. Nutrient mineralization and leaf litter preference by the earthworm *Pontoscolex corethrurus* on iron ore mine wastes. *Restoration Ecology*, 11: 475-482.
- García J.A. & Fragoso C. 2003. Influence of different food substrates on growth and reproduction of two tropical earthworm species (*Pontoscolex corethrurus* and *Amyntas corticis*). *Pedobiologia*, 47: 754-763.
- Gomiero T., Paoletti M.G. & Pimentel D. 2008. Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27: 239-254.
- González G., Huang C.Y., Zou X. & Rodríguez C. 2006. Earthworm invasions in the tropics. *Biological Invasions*, 8:1247-1256.
- Herencia J.F., Ruiz J.C., Morillo E., Melero S., Villaverde J. & Maqueda C. 2008. The effect of organic and mineral fertilization on micronutrient availability in soil. *Soil Science*, 173: 69-80.
- Jana U., Barot S., Blouin M., Lavelle P., Laffray D. & Repellin A. 2010. Earthworms influence the production of above- and belowground biomass and the expression of genes involved in cell proliferation and stress responses in *Arabidopsis thaliana*. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 244-252.
- Jouquet P., Dauber J., Lagerlof J., Lavelle P. & Lepage M. 2006. Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, 32: 153–164.
- Jouquet P., Bottinelli N., Podwojewski P., Hallaire V. & Tran Duc T. 2008a. Chemical and physical properties of earthworm casts compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam. *Geoderma*, 146: 231-238.
- Jouquet P., Podwojewski P., Bottinelli N., Mathieu J., Ricoy M., Orange D., Tran Duc T. & Valentin C. 2008b. Above-ground earthworm casts affect water runoff and soil erosion in Northern Vietnam. *Catena*, 74: 13-21.
- Jouquet P., Plumere T., Thuy Doan Thu, Rumpel C., Toan Tran Duc & Orange D. 2010. The rehabilitation of tropical soils using compost and vermicompost is affected by the presence of endogeic earthworms. *Applied Soil Ecology*, 46: 125-133.
- Jouquet P., Traoré S., Choosai C., Hartmann C. & Bignell D. 2011a. Influence of termites on ecosystem functioning : ecosystem services provided by termites. *European Journal of Soil Biology*, 47: 215-222.
- Jouquet P., Bloquel E., Thu Doan T., Ricoy M., Orange D., Rumpel C., Tran Duc T. 2011b. Does compost and vermicompost improve macronutrient retention and plant growth in degraded tropical soils? *Compost Science & Utilization*, 19: 15-24.
- Langmaack M., Schrader S., Rapp-Bernhardt U. & Kotzke K. 2002. Soil structure rehabilitation of

- arable soil degraded by compaction. *Geoderma*, 105: 141-152.
- Laossi K.R., Noguera D. & Barot S. 2010a. Earthworm-mediated maternal effects on seed germination and seedling growth in three annual plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 319-323.
- Laossi K.R., Decaëns T., Jouquet P. & Barot S. 2010b. Can we predict how earthworm effects on plant growth vary with soil properties? *Applied and Environmental Soil Science*, 20: article ID 784342
- Laossi K.R., Noguera D., Decaëns T. & Barot S. 2011. The effects of earthworms on the demography of annual plant assemblages in a long-term mesocosm experiment. *Pedobiologia*, 54: 127-132.
- Lavelle P., Bignell D. & Lepage M. 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology* 33: 159-193.
- Lavelle P., Pashanasi B., Charpentier F., Gilot C., Rossi J.P., Derouard L., Andre J., Ponge J.F. & Bernier N. 1998. Large-scale effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics. In *Earthworm Ecology*, Edwards C.A. (Ed.), Boca Raton, FL, USA, CRC Press: 103-122.
- Lavelle P. & Spain A.V. 2001. *Soil Ecology*. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, 654 pp.
- Lavelle P., Decaëns T., Aubert M., Barot S., Blouin M., Bureau F., Margerie P., Mora P. & Rossi J.P. 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42: S3-S15.
- Mando A., Stroosnijder, L. & Brussaard L. 1996. Effects of termites on infiltration into crusted soil. *Geoderma*, 74: 107-113.
- Mando A. & Brussaard L. 1999. Contribution of termites to the breakdown of straw under Sahelian conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 29: 332-334.
- McGarry D., Bridge B.J. & Radford B.J. 2000. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil Tillage Research*, 53: 105- 115.
- Ngo P.T., Rumpel C., Dignac M.F., Billou D., Tran Duc T., Jouquet P. 2011. Transformation of Buffalo manure by composting or vermicomposting to rehabilitate degraded tropical soils. *Ecological Engineering*, 37: 269-276.
- Noguera D., Rondón M., Laossi K.R., Hoyos V., Lavelle P., Cruz de Carvalho M.H. & Barot S. 2010. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 1017-1027.
- Noguera D., Laossi K.R., Lavelle P., Cruz de Carvalho M.H., Asakawa N., Botero C. & Barot S. 2011. Amplifying the benefits of agroecology by using the right cultivars. *Ecological Applications*, 21: 2349-2356.
- Paoletti M. 1999. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74: 137-155.
- Pardeshi M. & Prusty B.A.K. 2010. Termites as ecosystem engineers and potentials for soil restoration. *Current Science*, 99: 11-11.
- Rabary B., Blanchart E., Andriamanantena Z., Hervouet C., Douzet J.M., Michellon R., Moussa N. and Chotte J.L. 2008. Activités biologiques et dynamique de la matière organique du sol sous systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale (Hauts plateaux de Madagascar). *Terre malgache*, 26: 29-33.
- Roose E. 1976. Contribution à l'étude de l'influence de la mésofaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical. Rapport interne ORSTOM, Abidjan, 56 pp.
- Roose E., Kaboré V. & Guenat C. 1999. Zaï practice: a West African traditional rehabilitation system for semiarid degraded lands, a case study in Burkina Faso. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13: 343-355.
- Ruiz N., Mathieu J., Célini L., Rollard C., Hommay G., Iorio E. & Lavelle P. 2011. IBQS: A synthetic index of soil quality based on soil macro-invertebrates communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 2032-2045.
- Scheu S. 2003. Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiologia*, 47: 846-856.
- Senapati B., Lavelle P., Giri S., Pashanasi B., Alegre J., Decaëns T., Jimenez J.J., Albrecht A., Blanchart E., Mahieu M., Rousseaux L., Thomas R., Panigrahi P.K. & Venkatachalam M. 1999. In-soil earthworm technologies for tropical ecosystems. In Lavelle P., Brussaard L. & Hendrix P. (eds) *Earthworm management in tropical agroecosystems*. CABI Publishing, 199-238.
- Stoate C., Boatman N.D., Borralho R.J., Rio Carvalho C., de Snoo G.R. & Eden P. 2001. Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management*, 63: 337-365.
- Toyota A., Kaneko N. & Ito M.T. 2006. Soil ecosystem engineering by the train millipede *Parafontaria laminata* in a Japanese larch forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 38: 1840-1850.
- Zirbes L., Mark M., Vrancken V., Wathélet J.P., Verheggen F., Thonart P. & Haubruge E. 2011. Earthworms use odor cues to locate and feed on microorganisms in soil. *PLoS ONE*, 6: 21927.

**Restauration de la productivité
des sols tropicaux et méditerranéens**

Contribution à l'agroécologie

Version préliminaire



Eric ROOSE
Editeur scientifique

IRD Editions
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT
MONTPELLIER, JUILLET 2015