

Une perspective écologique sur la restauration des sols dégradés

Francis SHAXSON & ERIC ROOSE

Greensbridge, Winterborne Kingston, Dorset DT 11 9BJ, UK

Courriel : francisshaxson@btinternet.com

Résumé

La restauration des sols dégradés peut viser trois objectifs : reconstruire le potentiel de production de l'eau et des sols, améliorer leur résilience face aux risques futurs et augmenter leur durabilité. D'un point de vue écologique les sols sont des entités vivantes dont les composantes sont en relation avec les principaux facteurs de la productivité des sols. De là on peut développer différentes approches pour déterminer les causes de leur dégradation actuelle, décider quel processus améliorant doit être mis en route et comment gérer ces processus de telle façon qu'on atteigne les objectifs. Cette approche nous conduit au développement de la gestion durable de l'eau et de la fertilité des sols (GCES ou Better Land Husbandry).

Mots-clés : restauration des sols, dégradation des sols, gestion de l'eau, gestion des nutriments, productivité des sols, GCES

Abstract

The objectives of restoring damaged rural soils are: to re-build their potentials for yielding plants and water; to increase their resilience in the face of future hazards and to raise their capacity for self-sustainability. From an ecological viewpoint soils may be considered as living entities, of which the four key interacting components of soil/plant ecosystems are sketched, together with the main requirements for soil to function effectively as a productive medium. From these can be developed suitable approaches to determine the causes of the present damage, to decide what remedial processes need to be initiated, and how these should be managed most appropriately to reach the stated objectives. Taking such an approach leads to better land husbandry.

Keywords: soil restoration, soil degradation, water management, soils productivity, Better Land Husbandry

1. Introduction

Jusque vers les années 1960, l'objet de la « conservation de l'eau et des sols » consistait essentiellement à construire des fossés, des talus, des terrasses et des billons alignés sur les courbes isohypses en vue de lutter contre l'érosion dans les régions tropicales et méditerranéennes. Il était entendu, qu'aussi longtemps que ces structures physiques ne cassaient pas, le ruissellement ne causait pas de dommage et que leur entretien préservait la fertilité des sols. Cependant ces structures furent aussi appliquées sur des sols déjà érodés, mais elles n'ont pas, par elles-mêmes, restauré la productivité des sols endommagés. A cette époque, le sol était considéré comme l'horizon superficiel couvrant la roche altérée dans lequel les plantes s'enracinaient.

Lorsqu'en 1958, Shaxson devint officier de la « conservation des sols » au Nyassaland (maintenant le Malawi), quelques essais de paillage avec des herbes ont montré qu'on pouvait réduire le ruissellement et l'érosion en absorbant l'énergie des gouttes de pluie. L'observation de l'effet favorable des fines racines des herbes sur la structure du sol a montré qu'on pouvait améliorer le sol avec des matières organiques vivantes ou mortes et en même temps réduire les risques de ruissellement et d'érosion. Après cela le problème de la compaction du sol par les grosses gouttes de pluie, par le piétinement du bétail et des paysans et par les roues des tracteurs devint un facteur évident de l'érosion considérée comme la cause majeure de la baisse des rendements des sols à la fois sur les petits champs villageois et dans les fermes commerciales. Les inondations et le dépôt des terres érodées étaient des problèmes majeurs pour les gouvernements tant à l'échelle nationale que dans chaque district.

A son arrivée au Brésil dans les années 1980, Shaxson fut très étonné de voir que les fermes commerciales des paysages du centre et du sud du Brésil étaient couvertes de nombreuses structures physiques de conservation des sols : elles souffraient toujours des mêmes problèmes sévères de compaction, ruissellement excessif, érosion et inondation. Cependant quelques fermiers à l'esprit pionnier avaient commencé à développer des systèmes de culture comportant le semis direct des graines à travers la litière des résidus des cultures précédentes, avec beaucoup de succès.

Le ruissellement et l'érosion ont quasiment disparu tandis que le rendement des cultures a augmenté et que leur coût de production diminuait. Les rivières qui jadis débordaient en saison des pluies et s'asséchaient en saison sèche, coulent désormais de façon continue, même en période sèche.

Les recherches sur le mode de fonctionnement du semis direct sous litière ont montré que, une fois l'horizon compact et l'horizon superficiel ont été aérés et permettent l'entrée des pluies les plus intenses dans le profil, la litière des résidus des cultures précédentes devient une ressource de carbone pour la transformation microbiologique des conditions du sol favorisant en même temps la croissance des plantes et la conservation de l'eau et du sol. Plus tard, des recherches et observations au Brésil et ailleurs ont confirmé cet aspect du sol considéré comme une entité biologique (FAO, 1982), ce qui a remis en cause le concept de conservation de l'eau et des sols et fournit les bases des principes qui vont suivre (Shaxson, 2006).

Il y a des signes avant coureurs du déclin du fonctionnement de l'écosystème : l'extension de zones dénudées dans les champs,

l'invasion par des mauvaises herbes, la dégradation de la répartition des plantes arbustives et graminéennes, le dessèchement rapide du sol après les pluies, l'augmentation de l'érosion et le décapage des horizons de surface, l'exposition d'horizons de sub-surface moins fertiles, la baisse des rendements pour des traitements semblables, la dégradation du régime hydrologique des rivières. Ces signes sont des conséquences et non des causes primaires de la dégradation (Roose, 1996). Ce sont des indicateurs de la mauvaise adaptation des méthodes d'aménagement du paysage qui réduit la résilience et la durabilité du potentiel de ces terres (Shaxson et al., 1989). Dans le passé, nos échecs face à la restauration de la productivité des sols, proviennent souvent de notre perception erronée des causes profondes de la dégradation des sols et aussi des remèdes à appliquer (Shaxson, 2006 ; Roose et al., 2011).

2. Une approche écologique de la restauration des sols et du maintien de leur santé et de leur productivité

Les plantes fournissent les matériaux indispensables à la vie animale : elles requièrent des conditions édaphiques favorables à leur développement mais aussi à la santé des êtres vivants dans les horizons de surface du sol où se développent les racines (Uphoff et al., 2006). Il faut donc considérer les sols comme des entités vivantes et des écosystèmes particulièrement complexes. Leur fonctionnement et leurs relations sont dynamiques et potentiellement durables, mais elles peuvent être rompues par l'application d'un aménagement ou d'un usage inappropriés.

A la lumière de ce concept, dans une zone donnée, il est possible d'étudier les succès et les erreurs des aménagements des divers paysages (dont les sols sont des constituants) en vue d'expliquer la dégradation de la productivité passée, comment les sols vont réagir à un aménagement dans le futur, de décider la meilleure façon de restaurer durablement le paysage en tenant compte du climat et de la topographie et finalement de planifier une stratégie d'aménagement optimal pour chaque secteur fonctionnel du paysage en vue d'assurer la durabilité de sa productivité.

« La capacité d'une terre à produire durablement des plantes et de l'eau dépend d'abord du maintien du sol en bonne condition pour permettre le déroulement de la vie sous toutes ses formes dans le système sol-plante. Ces activités biologiques vont fabriquer ou restaurer l'architecture de la porosité et de la structure du sol ; c'est sa capacité à récupérer ses propriétés physiques dégradées ou sa résilience face aux agressions climatiques ou aux aménagements néfastes » (FAO, 2008).

2.1 L'écosystème sol-plantes

La capacité du sol à produire des plantes est le résultat des effets, à différentes échelles, des interactions entre les composantes physiques x chimiques x biologiques x hydrologiques du milieu et leurs effets à l'interface racines-rhizosphère.

- **Au niveau physique** : la structure et la porosité du sol, liées à l'aération, la pénétration des racines, le stockage en eau et l'infiltration;

- **Au niveau chimique** : les nutriments assimilables, les exsudats des racines et des micro-organismes du sol, les argiles actives et leur capacité d'échange des cations ;
- **Au niveau biologique** : tout ce qui vit dans le sol, y compris les racines, les matières organiques sur et dans le sol comme source d'énergie et de nutriments pour les êtres vivants ;
- **Au niveau hydrologique** : la capacité d'infiltration de l'eau, la rétention de l'eau à diverses tensions, la transmission en profondeur des eaux libres excédentaires.

Pour la restauration et l'entretien des sols dégradés, il faut garder à l'esprit la fourniture suffisante (dans le temps et dans l'espace) des facteurs interdépendants :

- **l'eau** assurant le bon fonctionnement au-dessus et en dessous de la surface du sol; les zones arides en manquent régulièrement.
- **la porosité du sol**, avec un volume suffisant et une bonne répartition entre les particules et les agrégats, permettant un flux adéquat d'oxygène et de CO₂ pour la respiration et une haute capacité de stockage de l'eau entre le point de flétrissement et la capacité au champs, tout en gardant des pores largement ouverts pour permettre le drainage des eaux excédentaires vers la nappe profonde.
- **les matières organiques riches en carbone** : une source d'énergie et de nutriments pour les plantes et autres éléments vivants. Ces matières carbonées sont synthétisées par la photosynthèse des plantes et sont présentes dans les feuilles vivantes et mortes, leurs tiges et racines et dans les bactéries+champignons, les animaux, qui à leur mort sont recyclés dans les MO du sol, devenant à leur tour des sources d'énergie et de nutriments pour les générations futures.
- **les nutriments** pour renouveler les stocks épuisés, particulièrement l'azote pour la synthèse des protéines (si possible fournie par des espèces fixant l'azote de l'air) mais aussi le phosphore, la potasse et les micronutriments provenant de l'altération des roches ;
- **divers organismes vivants dans le sol** pour les multiples fonctions qu'ils assurent dans tous les systèmes sol-plantes et leurs rôles dans l'amélioration de la durabilité.

La cause principale de la dégradation de la santé du sol et de sa productivité se trouve dans la perte des matières organiques (MO) sur et dans le sol : elle contribue en effet à la protection de la surface du sol contre les températures extrêmes et les pluies intenses, aux stocks de nutriments et d'énergie, à la capacité d'échange des cations et la production d'humus qui participe à la stabilité structurale et à la protection de la porosité.

La restauration des sols doit commencer par identifier la cause originale de la dégradation des MOS et réduire ce danger. Ensuite, les mesures doivent être prises pour remédier à ces causes de façon durable pour assurer leur pérennité.

2.2 Les facteurs endommageant les sols

2.2.1 Les techniques culturales

Les sols bien structurés favorisent la croissance des plantes et la pénétration des eaux, stockent plus d'eau utile que ceux qui ont été endommagés par des labours, la pulvérisation ou la compaction du sol.

Le déplacement du sol par les outils, en particulier les charrues à disques lourds, presse les particules du sol et réduit leur macroporosité. Par ailleurs le labour introduit de l'air dans le sol, augmente la respiration des organismes vivant dans le sol, oxyde les matières organiques du sol et rejette dans l'atmosphère du gaz carbonique à effet de serre (Reikosky, 2001)

Table 1. Perte de matières organiques du sol sous l'influence de diverses techniques culturales (Glanz, 1995, in FAO 2005a. p.18)

Type de travail du sol	Perte de MO en kg/ha/19 jours
Charrue + hersage à disques	4300
Charrue	2230
Hersage à disques	1840
Chisel	1720
Semis direct	860

Ces techniques culturales entraînent la perte de matières organiques liant les particules de sol (radicelles et micelles de champignons) et des colles biologiques : ces pertes vont réduire l'aptitude du sol de fonctionner comme un milieu favorisant la croissance des plantes (Moebius-Clune et al., 2011), (Solomon et al., 2007). Il entraîne une baisse de production sans changement de technique culturale (Evans, Banda & Seymour, (1999) ; (Lahmar et al., 2012).

Table 2. Signes de dégradation d'un sol déforesté et cultivé à la main pendant 80 ans : chronoséquence au W. Kenya de 1920 à 2000.

Durée depuis le défrichement	5	10	20	30	40	50	60	80
Score moyen de 3 indicateurs*	12	3+	3	2+	2	2-	2-	1

*Combinaison de trois indicateurs de dégradation du sol : le taux de carbone organique dans le sol en % + masse de paille du maïs (kg/ha) + poids des épis de maïs (kg/ha). Les poids de paille et des épis de maïs suivent étroitement la réduction du taux de MOS pendant toute la période, d'abord rapide, puis plus lente (d'après Marenya & Barrett, 2009).

2.2.2 Autres actions causant la perte de la structure du sol

En plus des pertes de MO liant les particules du sol (racines, champignons et humus), les pluies de forte intensité et le passage des hommes, du bétail et des roues des véhicules sur les sols nus peuvent entraîner le tassement du sol. De même, la réaction du sol poussé vers l'aval par les engins de travail du sol - surtout le labour aux disques lourds, compacte le sol en surface et en profondeur, écrasant la macro-porosité,

réduisant la pénétration des eaux de pluie, la circulation du CO₂ dans la zone occupée par les racines et la croissance des plantes (Roose, 1996).

Réalisées en condition sèche, ces actions pulvérisent l'horizon de surface et réduisent la porosité et donc la perméabilité, l'infiltration des eaux de pluies au détriment des plantes et du débit des eaux de nappe qui nourrissent les rivières. La dégradation de la structure du sol favorise donc le développement du ruissellement plutôt que l'infiltration des eaux de pluie (Roose, 1996)

2.2.3 Le surpâturage et d'autres formes de cultures exportant les résidus de culture et les nutriments.

Le rythme de réhabilitation des sols dégradés, simplement par l'altération géologique des roches et autres niveaux profonds du sol, est nettement plus lent si les plantes sont absentes. Elles fournissent des matériaux biologiques riches en carbone grâce aux acides organiques complexes percolant à travers tout le profil.

L'exportation de végétaux par les animaux, le feu et/ou la récolte, à un rythme que les plantes ne peuvent suivre, représente pour le sol une perte potentielle de matières organiques (feuilles, tiges et racines) et les nutriments qui y sont associés.

2.3 Les aménagements

Dans les zones sèches, les paysans qui y vivent depuis longtemps ont accumulé progressivement une expérience et des connaissances sur le milieu local qui peuvent servir de point de départ pour l'amélioration des aménagements en vue d'augmenter la productivité durable de leurs sols, plantes et animaux (Lahmar et al, 2012). « Même en milieu semi-aride des savanes sèches, quand on cesse de perturber le sol, il est possible de reconstituer progressivement le couvert végétal et la matière organique du sol. Là où la demande en résidus de culture est élevée pour nourrir le bétail, il faut gérer la biomasse afin qu'elle améliore la productivité sur une longue période » (A.Kassam, pers. comm. 2012). La clé de la restauration du sol est la gestion de l'eau, des plantes et des MO du sol, chacun renforçant l'action améliorante des autres.

*** Réduction du travail du sol dès qu'il est en bon état**

De cette façon, l'équilibre dynamique se développe et se maintient entre les composantes chimiques x physiques x biologiques x hydrologiques du système sol-plantes.

*** Tirer profit des légumineuses**

En introduisant, encourageant et maintenant des légumineuses capables de fixer l'azote de l'air, on contribue à la nutrition des plantes dans la zone parcourue par les racines.

*** Introduire et maintenir des rotations**

La rotation entre diverses cultures et l'intensification des parcours sont bénéfiques pour maintenir la diversité biologique et limiter les pestes, les maladies et les mauvaises herbes, de la même façon qu'un repos ou une pâture suffisamment longue peut contribuer à rétablir le taux de MO en

brisant le cycle de vie des pestes dangereuses, des maladies et des adventices.

* **Assurer la capture, la rétention et l'infiltration de toutes les pluies** en couvrant toute la surface du sol par les plantes vivantes et leurs résidus disposés perpendiculairement à la pente, jusqu'à atteindre si possible 100% de sol couvert. Ceci diminue la battance des pluies intenses et la compaction par le passage des gens et des roues. C'est le point de départ des activités biologiques du sol qui réduit les températures extrêmes dans les horizons superficiels, les plus riches en racines. En aménageant des bassins de 20 à 200 cm de diamètre (Zaï, tassa, demi-lunes, cuvettes, billonnage cloisonné), on concentre sur une zone limitée au pied des plantes le peu d'eau disponible et on lui laisse le temps de s'infiltrer.

Dans les zones sèches cultivées du Zimbabwe, l'effet positif potentiel de l'usage des engrais est pratiquement contrecarré par le manque d'eau dans le sol, même quand les cultures sont plantées dans des petites cuvettes (**Wagstaff & Harty., 2010**)

Utiliser les synergies entre les quatre facteurs

Certaines exigences d'un système d'usage du sol peuvent être remplies par les synergies de ces quatre principes appliqués ensemble. Ces quatre moyens, utilisés ensemble ont un impact positif sur la santé et les qualités des horizons racinaires. Cela demande du temps (pas seulement une saison) pour réajuster les écosystèmes de sols, mais ensuite ils fournissent de grands avantages même si les conditions climatiques sont variables. L'expression optimale de la productivité des cultures et pâtures dépend aussi de la présence prolongée de taux d'humidité et de nutriments suffisants sous des formes assimilables par les plantes. S'il manque un seul facteur, il va limiter l'impact positif des autres facteurs de production.

Ces principes sont applicables sur les zones cultivées ou pâturées, en milieux secs ou humides. Cependant en milieux cultivés, il faut prévoir des applications spécifiques de fumier et d'engrais minéraux complémentaires. En appliquant ces mesures appropriées pour réaliser les meilleures conditions, ces paysans peuvent être convaincus de pratiquer les usages de l'Agriculture de Conservation appliqués depuis plus de 40 années au Brésil et plus récemment en Afrique (**Thierfelder et al., 2012**). Les bénéfices de telles améliorations ont été perçus et appréciés durant de nombreuses années à l'échelle des fermes, des communautés locales, du bassin versant et de la région entière (**Pieri et al., 2002; Marongwe et al., 2011**). Lorsque ces principes sont appliqués en même temps que les aménagements physiques adaptés, la production devient plus régulière, même lorsque le climat connaît de grosses variations.

Table 3: Améliorer les conditions dans la zone d'enracinement en adoptant quatre principes clés de tout aménagement (dérivé de Kassam et al., 2011)

Pour arriver à ces fins → utiliser ces moyens →	Couverture du sol: feuilles d'arbres, résidus de culture, plantes de couverture	NO TILLAGE perturbation minimale une fois le sol en bon état, semis direct sous litière	Légumineuse pour fixer l'azote de l'air et apporter des nutriments aux plantes	Rotation ou associations pour améliorer la biodiversité (sécurité)
Reconstituer les conditions de dynamique des sols ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Simuler les conditions optimales du sol forestier ⇒	↑↑	↑↑		
Maximiser l'infiltration, réduire le ruissellement ⇒	↑↑	↑↑		
Minimiser la compaction par les averses et l'impact de la circulation des hommes et des machines ⇒	↑↑	↑↑		
Minimiser les pertes en sol par le ruissellement et par le vent ⇒	↑↑	↑↑		
Réduire l'évaporation de l'humidité de la surface du sol ⇒	↑↑			
Réduire l'évaporation des horizons superficiels ⇒	↑↑	↑↑		
Réduire les fluctuations de température à la surface du sol ⇒	↑↑			
Fournir régulièrement en OM = substrat pour la vie microbienne ⇒	↑↑			
Réduire l'oxydation des MO du sol et les pertes de CO ₂		↑↑		
Accélérer la récupération de la porosité du sol par les êtres vivants dans le sol ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Maintenir la structure naturelle en horizons du sol par les actions biologiques	↑↑	↑↑		
Augmenter la CEC de la zone racinaire pour stocker les nutriments épandus ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Augmenter le taux d'azote dans la zone racinaire ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Augmenter la production de biomasse ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Recycler les nutriments ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Réduire les pestes				↑↑

3. CONCLUSION

Une approche écologique de cette nature fournit un ensemble de principes pour estimer l'efficacité des efforts fournis jadis pour porter remède aux sols dégradés. En même temps ces principes suggèrent comment optimiser la planification et l'exécution future des aménagements et de l'utilisation des sols.

Les conséquences des actions de régénération, de protection et de productivité des sols décrits plus haut sont conformes avec le concept plus large de l'amélioration de la gestion de l'eau et des terres (better land husbandry ou la GCES), à l'échelle des paysages (**Shaxson et al., 1989 ; Roose, 1996**).

De nouvelles recherches démontrent que, lorsque le taux de MO du sol est descendu trop bas, les cultures ne répondent plus à l'application de fumures minérales : la croissance de leur production ne couvre plus le coût des engrais. Ces résultats confirment que le maintien d'un niveau suffisant de MO dans le sol est essentiel tant pour l'infiltration de l'eau et son stockage dans les horizons parcourus par les racines, que pour les êtres vivants dans le sol qui interviennent pour la croissance des plantes. (**Marenya & Barrett, 2009 ; Rishirumuhirwa, 2006 ; Roose et al., 2011**)

Bibliographie

- Evans J, Banda A., Seymour J., 1999.** Opportunities for better soil management. In: *Organic matter – key to agriculture's sustainability*. In: *Agriculture for Development* 10, 2010. Tropical Agriculture Assoc., U.K.
- FAO, 1982.** World Soil Charter. <http://www.fao.org/docrep/T0389E/T0389E0b.htm> 5pp.
- FAO, 2005a.** The importance of organic matter. Bot A., Benites J., eds, *Soils Bulletin* 80, FAO Rome, p.18
- FAO, 2005b.** Drought-resistant soils: optimization of soil moisture for sustainable crop production. (A.Bot, J.Benites, eds.) Topic 2, item 8, on CD. Rome: FAO. ISBN: 92-5-105358-8.
- FAO, 2008.** An international workshop 'Investing in sustainable crop intensification : the case for improving soil health'. *Integrated Crop Management*, vol. 6, : 90 Rome: FAO. ISBN 978-92-5-106323-1.
- FAO, 2011.** Save and grow : a policymakers guide to the sustainable intensification of smallholder crop production. FAO Rome, 102 p., ISBN 978-92-5-106871-7
- Kassam A., Friedrich T., Shaxson F., Reeves T., Pretty J., de Moraes Sá JC., 2011.** Production systems for sustainable intensification: integrating productivity with ecosystem services. *Technikfolgenabschätzung* 38-45, (p.40). Karlsruher Institut für Technologie.
- Lahmar R., Bationo B.A., Lamso N.D., Guéro Y., Tiftonell P., 2012.** Tailoring conservation agriculture technologies to West Africa semi-arid zones: building on traditional local practices for soil restoration. *Field Crops Res.*, 132 : 158-167.
- Marenya P, Barrett C.B., 2009.** State-conditional fertilizer yield response on western Kenyan farms (2002-2009). *American J. Agric. Economics*, 91, 4 : 91-106.
- Marongwe L., Kwazira K., Jenrich M., Thierfelder C., Kassam A., Friedrich T., 2011.** An African success : the case of conservation agriculture in Zimbabwe. *Intl. J. Agric. Sustainability* 9, 1 : 153-161.
- Moebius-Ciune B.N., van Es H.M., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Kimetu J.M., Ngoze S., Lehmann J., Kinyangi J.M., 2011.** Long-term soil quality degradation along a cultivation chronosequence in western Kenya. : *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141 : 86-99.

- Ngwira A., Thierfelder C., Lambert D., 2012.** Conservation agriculture, systems for Malawian smallholders: longterm effects on crop productivity, profitability and soil quality. Renewable Agriculture and Food Systems.
- Pieri C., Evers G., Landers J., O'Connell P., Terry E., 2002.** No-till farming for sustainable rural development. Washington: World Bank: Agriculture and Rural Development Working Paper, 65 p.
- Rishirumuhirwa Th. 2006.** Lutte antiérosive et recherches en gestion conservatoire de l'eau et des sols au Burundi. In : « *Erosion et GCES* » Ratsivalaka S., Serpantié G., De Noni G., Roose E., eds, Editions AUF-GB, Paris 310 p : pp. 57-63.
- Roose E., 1996.** Land Husbandry – components and strategy. FAO Soils Bulletin 70, 380 p. ISBN 92-5-103451-6. Rome: FAO/UN.
- Roose E., Bellefontaine R, Visser M., 2011.** Six rules for the rapid restoration of degraded lands : synthesis of 17 case studies in tropical and Mediterranean climates. *Sécheresse*, 22, 3 : 1-12.
- Shaxson T.F., 2006.** Re-thinking the conservation of carbon, water and soil: a different perspective. *Agronomie* 26 : 1-9.
- Shaxson T.F., Hudson N.W., Sanders D.W., Roose E., Moldenhauer W.C., 1989.** Land husbandry: a framework for soil and water conservation. Ankeny, (USA) Soil & Water Cons. Soc. + World Assoc. Soil & Water Cons.. ISBN 0-935734-20-1, 64 p.
- Solomon D., Lehmann J., Kinyangi J., Amelung W., Lobe I., Pell A., Riha S., Ngoze S., Verchot L., Mbugua D., Skjemstad J., Schäfer T., 2007.** Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems : *Global Change Biology* 13, 1-20.
- Thierfelder C, Cheesman S., Rusinamhodzi L., 2012.** Benefit and challenges of crop rotations in maize-based conservation agriculture cropping systems in Southern Africa. *Int.J. Agric.Sustainability*
- Uphoff N., Ball A.S., Fernandes E., Herren H., Husson O., Laing M., Palm C., Pretty J., Sanchez P., Sanginga N., Thies J. (eds). 2006.** Biological approaches to sustainable soil systems. 764 p. CRC Press / Taylor & Francis. Boca Raton (USA). ISBN-10: 1-57444-583-9.
- Wagstaff P, Harty M., 2010.** The impact of conservation agriculture on food security in three low veldt districts of Zimbabwe. *Trócaire Development Review / 2010.* 67-84. p.70.

**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