

Déterminants organiques et biologiques de l'agrégation : implications pour la recapitalisation de la fertilité physique des sols tropicaux

Alain Albrecht, Denis A. Angers,
Michael H. Beare, Éric Blanchart

Le concept de « recapitalisation » de la fertilité des sols tropicaux vient du constat selon lequel les agricultures tropicales sont minières, avec, à la fois, peu de restitutions permettant de compenser les exportations par la plante et des pertes importantes par érosion. Par ailleurs, l'exploitation des ressources-sol s'accroît avec le développement de la population qui conduit à la mise en culture de sols fragiles à niveau de fertilité médiocre. Il résulte de ces pratiques une diminution des rendements qui peuvent tomber à des niveaux dérisoires, à l'opposé des systèmes de cultures des pays développés, où les intrants et le niveau de production (entrée par voie racinaire et restitutions des pailles, cultures dérobées et maintenant jachères

obligatoires soutenues par des fonds transnationaux) permettent un stockage des éléments nutritifs dans le sol [1].

La notion de « recapitalisation » doit prendre en compte les composantes chimiques et physiques de la fertilité afin d'atteindre un bilan positif des nutriments par l'utilisation d'engrais minéraux et/ou d'amendements organiques (qui doivent être disponibles pour les paysans et peu coûteux), de limiter les pertes par érosion et de créer dans le sol des conditions favorables à l'enracinement, à l'infiltration et à une limitation de la compaction, ainsi qu'une conservation de la ressource-sol par un contrôle de l'érosion.

Ces composantes sont étroitement liées à la dynamique des matières organiques et aux activités biologiques du sol, ces deux aspects étant fortement interdépendants. Une gestion optimum des matières organiques du sol (MOS), en favorisant les restitutions et en limitant les pertes par érosion, est donc essentielle pour assurer cette recapitalisation. Mais la compréhension des processus mis en jeu tant du point de vue chimique que physique passe par l'analyse des interactions entre MOS et activités.

Le sol est un milieu organisé ; cette organisation influe directement sur l'ensemble des propriétés du sol et dépend des inter-

actions bio-organo-minérales qui s'expriment par une organisation à différentes échelles. La structure du sol peut se définir soit par l'arrangement des vides (la porosité), soit par l'arrangement des solides (l'agrégation). L'agrégation peut se caractériser sur le terrain (profils culturaux, simulation de pluies) et/ou en laboratoire (tamisages à sec et sous eau, tests de stabilité structurale, etc.).

L'objectif principal de ce travail est l'étude des déterminants de l'agrégation des horizons de surface de sols de la zone intertropicale ainsi que des enseignements que l'on peut en tirer pour une gestion améliorée de la fertilité.

Pour étudier les déterminants de l'agrégation, on se propose de distinguer les divers effets sur l'agrégation de l'environnement physique et du mode de gestion des terres, des processus (physiques, chimiques et biologiques) qui contrôlent la formation des agrégats et leur stabilité, ainsi que le rôle de l'agrégation du sol dans le maintien de sa fertilité physique et chimique.

La connaissance de ces déterminants et leur hiérarchisation devraient permettre d'adapter les techniques de recapitalisation de la fertilité physique des sols tropicaux aux contraintes du milieu, en termes de type de sol et de ressources organiques disponibles pour le paysan :

A. Albrecht : ORSTOM, ICRAF, avenue des Nations-Unies, Gigiri, BP 30677, Nairobi, Kenya.

D.A. Angers : Agriculture agro-alimentaire, 2560 boulevard Hochelaga, Sainte Foy, Québec, Q1V2J3 Canada.

M.H. Beare : New Zealand Institute for Crop and Food Research, Canterbury Agriculture and Science Centre, Private Bag, 4704 Christchurch, New Zealand.

É. Blanchart : ORSTOM-BOST, BP 8006, 97259 Fort-de-France, Martinique (FWI).

Tirés à part : A. Albrecht

résidus de récolte, fumiers, jachères et prairies en rotations, agroforesterie, composts agro-industriels ou urbains.

Stabilité de l'agrégation et type de sol

Le type de sol, par la nature et les propriétés de ses constituants minéraux (gonflement-retrait des argiles, liaisons argiles-sesquioxides de fer et d'aluminium, nature du complexe d'échange), détermine le niveau de base de l'agrégation [2].

Les sols étudiés ici (tableau 1), fortement représentés dans la zone intertropicale, sont des sols à argile de type 1:1 (sols ferrugineux et ferrallitiques de la classification française) et 2:1 (vertisols). Ces sols varient, entre autres, par le type et la quantité d'argile (1:1 et 2:1), la quantité de sesquioxides pour les sols à argile 1:1 et la nature de la garniture ionique pour les sols à argile 2:1.

Les modes d'agrégation ont été étudiés à partir de cinétiques de désagrégation de ces sols au cours de durées croissantes (0 à 16 h) d'agitation du sol dans l'eau selon Albrecht *et al.* [3], en prenant en compte trois classes d'agrégats : les macroagrégats MA (> 200 µm), les mésoagrégats ME (de 5 à 200 µm) et les microagrégats MI (< 5 µm). Le comportement des sols face à la désagrégation dans l'eau est présenté dans le sens d'une stabilité décroissante (figure 1). Les sols argileux à argile 1:1, riches en sesquioxides (oxisols), sont essentiellement constitués de macroagrégats associés à quelques mésoagrégats très stables (désagrégation de type MAE) ; les macroagrégats disparaissent, lorsque la texture de ces sols devient plus sableuse, au profit des mésoagrégats (désagrégation de type ME).

Pour les sols argileux à argile 2:1 (vertisols), l'agrégation stable à l'eau dépend de la garniture ionique des argiles [4] ; les vertisols calciques développent une macroagrégation stable, ces macroagrégats étant essentiellement constitués de microagrégats (désagrégation de type MAI). Lorsque la contribution à la garniture ionique de la somme sodium + magnésium échangeables est supérieure à 30 %, les macroagrégats stables à l'eau ont pratiquement disparu et le comportement dans l'eau de ce type de sol est comparable à celui de la dispersion (désagrégation de type MI) [5].

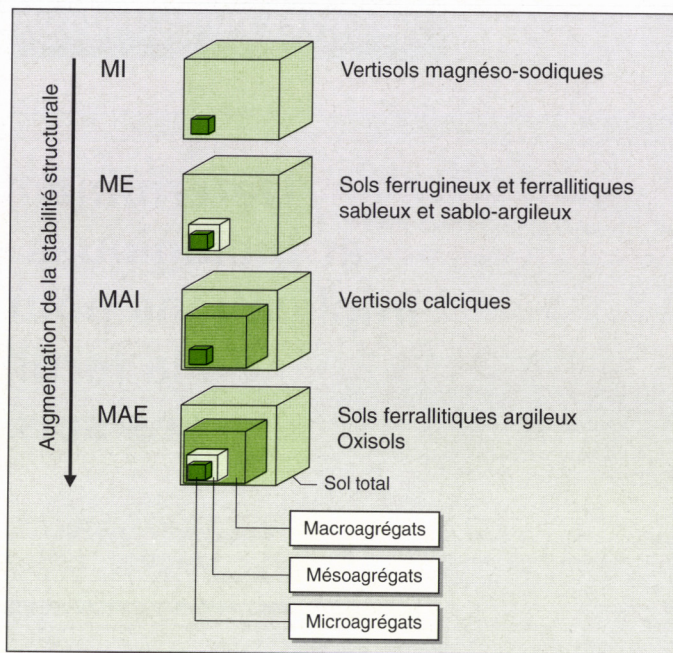


Figure 1. Mode de désagrégation dans l'eau de quelques types de sols tropicaux. MI : désagrégation du sol en microagrégats ; ME : désagrégation du sol en mésoagrégats ; MAI : désagrégation du sol en macro et microagrégats ; MAE : désagrégation du sol en macro et mésoagrégats.

Figure 1. Types of disaggregation in some tropical soils (MAE : disaggregation in macro- and mesoaggregates ; MAI : disaggregation in macro- and microaggregates ; ME : disaggregation in mesoaggregates ; MI : disaggregation in microaggregates).

Stabilité de l'agrégation et matières organiques du sol

Relation avec la MOS totale

De nombreux travaux ont mis en évidence les relations statistiques étroites existant entre teneur en MOS et stabilité de l'agrégation des horizons de surface des sols tro-

picaux [6]. Toutefois, les teneurs en MOS étant elles-mêmes déterminées par de nombreux facteurs écologiques (climat, végétation, sol) ou agronomiques (mode de gestion des terres) [7, 8], un ou plusieurs de ces facteurs peuvent intervenir dans la relation décrite. Nous discuterons ici des interactions avec la texture et la minéralogie. Ainsi, pour des sols tempérés, certains auteurs [9, 10] montrent que, pour une même teneur en carbone organique du sol, la stabilité de l'agrégation est d'autant plus élevée que le sol a une texture plus grossière. D'autres chercheurs [11]

Tableau 1

Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés

Type de sol	Lieu	Minéralogie*	Argile (% sol total)	Fe ₂ O ₃ - CBD** (g/kg de sol)	Cations échangeables (cmol ⁽⁺⁾ /kg de sol)			
					Ca	Mg	K	Na
Sol ferrallitique	Côte d'Ivoire	K-Hm	27	26	1,8	1,3	0,1	0
Oxisol	Brésil	K-Go- Hm-(Gi)	55	66	9,5	2,3	0,6	0,1
Vertisol calcique	Martinique	S	62		61,0	4,2	0,7	0,3
Vertisol magnésio-sodique	Martinique	S-(K)	52	10	20,8	11,0	0,5	3,7

* K = kaolinite ; H = halloysite ; S = smectite ; Go = goethite ; Hm = hématite ; Gi = gibbsite.

** Fe₂O₃-CBD : teneur en fer extrait par le citrate-bicarbonate-dithionite.

Some properties of the studied soils

trouvent, pour des sols tempérés, que bien que la teneur en argile détermine en grande partie l'agrégation, son effet varie selon le mode d'utilisation des sols et la gestion des MOS. L'effet de la prairie sur l'agrégation croît avec la teneur en argile.

Pour des sols argileux tropicaux, le rapprochement des travaux de Kouakoua [12] sur des sols à argile 1:1 et de ceux d'Albrecht [13] sur des sols à argile 2:1 fait apparaître que, pour une même amplitude des teneurs en carbone, le pourcentage de macroagrégats stables est nettement plus élevée dans les sols à argile 1:1, et que la part de l'agrégation non expliquée par la teneur en carbone (macroagrégats stables pour teneurs en carbone égales à 0) est beaucoup plus faible pour les sols à argile 2:1 (proche de 0 %) que pour ceux à argile 1:1 (50 %) (figure 2A). Cette part non expliquée pour les sols à argile 1:1 est probablement due aux sesquioxides de fer et d'aluminium.

Recherche de formes de MOS agrégeantes

La relation MOS-agrégation n'est pas toujours valide ; par exemple, Baldock et Kay [14] et Angers [15] observent, sous divers systèmes de culture et dans un climat tempéré froid, un changement dans la stabilité de l'agrégation sans modification notable de la teneur en carbone total. Ces résultats conduisent à penser que seules certaines formes de MOS ont un rôle agrégeant.

De nombreux composés organiques du sol ont été considérés comme ayant un rôle agrégeant : composés humiques, composés hydrosolubles (à froid ou à chaud) ou extractibles dans d'autres solvants polaires ou non polaires et, bien entendu, les polysaccharides totaux ou certaines de leurs formes particulières [8]. Plus récemment, le rôle des fractions granulométriques de la MOS a aussi été testé.

Il y a peu de doutes sur l'effet des polysaccharides dans la formation et la stabilisation des agrégats. Toutefois, ce ne sont pas toujours les polysaccharides totaux qui expliquent le mieux la variation de la stabilité des agrégats, surtout sur le court terme ; aussi différentes formes de polysaccharides ont été étudiées (extractibles à l'eau, aux acides ou aux bases). Sur la base de relations statistiques, un rôle important a été attribué à la fraction de polysaccharides extractible à l'eau chaude [16, 17]. Des résultats inverses ont été rapportés [18] concernant les polysaccharides extraits à l'eau. Le même type de relation statistique a été trouvé pour une collection

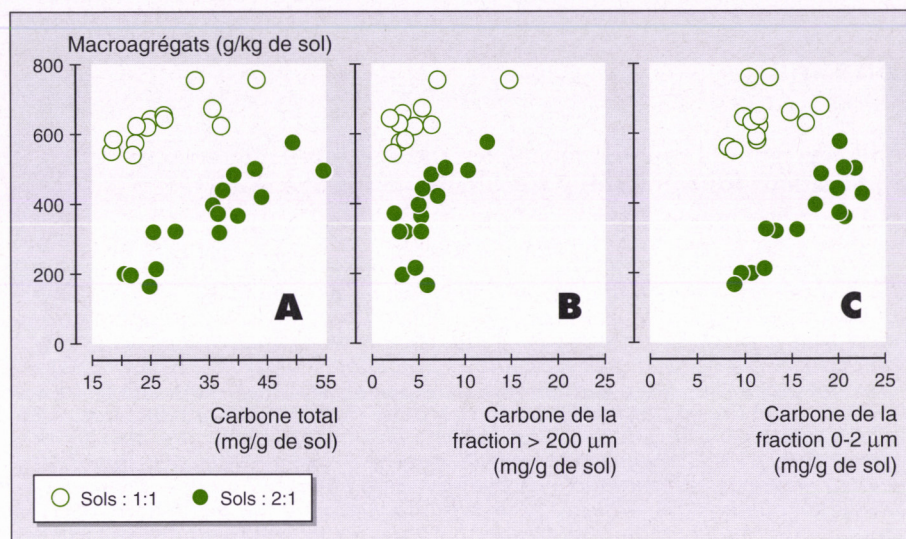


Figure 2. Relations entre la teneur en carbone (en mg C/g sol) des horizons de surface et la stabilité des agrégats. A : carbone total-macroagrégats stables dans l'eau selon la nature minéralogique des argiles ; B : carbone de la fraction > 200 μm - macroagrégats stables dans l'eau selon la nature minéralogique des argiles ; C : carbone de la fraction < 2 μm - macroagrégats stables dans l'eau, selon la nature minéralogique des argiles (d'après Kouakoua [12] et Albrecht [13]).

Figure 2. Relationships between the carbon content (mg C/g soil) of surface soil horizons and the stability of aggregates (WSA) for 1:1 and 2:1 soil. A : total carbon content vs water-stable macroaggregates (> 200 μm) according to clay type ; B : carbon content of the coarse fraction (> 200 μm) vs water-stable macroaggregates ; C : carbon of the fine fraction (< 2 μm) vs water-stable macroaggregates.

de sols ferrallitiques argileux [19] et pour le carbone total soluble à l'eau chaude, mais le contrôle direct des effets de cette fraction sur la stabilité de l'agrégation ne fait pas apparaître de relations causales. Ce type d'approche statistique est donc à considérer avec prudence. L'origine des polysaccharides pourrait être aussi déterminante. Ainsi, un rôle majeur est attribué aux polysaccharides d'origine bactérienne [20] tandis que certains auteurs [21] privilégieraient le rôle des polysaccharides d'origine végétale. Il est probable que, selon l'origine végétale et la forme d'apport au sol (par exemple litières ou exsudats racinaires), les polysaccharides pourraient jouer un rôle très différent sur l'agrégation.

Bien que la caractérisation de la MOS par des fractionnements granulométriques soit de plus en plus développée, il existe peu de données sur le rôle des MOS associées aux fractions granulométriques des sols vis-à-vis de la stabilité de l'agrégation. Nous rapportons ici quelques résultats d'Albrecht (non publiés) et de Kouakoua *et al.* [19] sur cette question qui permettent la comparaison de sols tropicaux argileux à argile 1:1 ou 2:1. Ainsi, les MOS associées aux fractions de taille inférieure à 200 μm (débris végétaux) contrôlaient,

en partie, la stabilité des agrégats pour les sols à argile 1:1 (figure 2B, C), alors que ce seraient les MOS associées aux particules argileuses (MOS de nature amorphe) qui joueraient un rôle essentiel dans la stabilité de l'agrégation des vertisols magnésosodiques décrits au tableau 1.

Relations avec la localisation des MOS et la composition des agrégats

Étudier les MOS associées aux agrégats permet d'aborder les mécanismes de stabilisation des agrégats et de comprendre comment l'agrégation des sols contribue au stockage et à la protection physique des MOS. Ces deux points sont fondamentaux pour la recapitalisation de la fertilité physique des sols. Outre leur origine, leur morphologie ou leur composition, la localisation des MOS au sein des agrégats a une influence sur la stabilité de l'agrégation. Il a été souvent observé une formation importante d'agrégats à la périphérie des matières organiques particulières (MOP) en cours de décomposition [22]. La localisation de ces MO et leur effet sur la stabilité de l'agrégation ont été étudiés

Summary

Soil aggregation, soil organic matter and soil biota interactions: implications for soil fertility recapitalization in the tropics

A. Albrecht, D.A. Angers, M.H. Beare, É. Blanchart

In tropical developing countries, arable soil degradation is not compensated for by the high inputs that generally help sustain high agricultural production in temperate developed countries. The reduced productivity of degraded tropical soils is often associated with a reduction in the availability of water and nutrients resulting from soil-structure degradation. For example, structurally unstable soils are more susceptible to erosion which, in turn, leads to a reduction in the water-holding capacity and nutrient availability, both of which influence crop productivity. Structurally unstable soils are also more susceptible to soil compaction, which impedes root growth and therefore lowers above-ground production. The structural stability of a soil is influenced by its inherent properties (e.g. texture, mineralogy), the quality and quantity of soil organic matter inputs and the activities of soil biota (i.e. microflora, roots and fauna).

The present study focused on the potential of soil aggregation for enhancing soil fertility recapitalization in the tropics, with particular attention to interactions between SOM, biological activity and soil structural stability. Many of the examples given are based on research carried out in West Africa, Brazil and the West Indies, with research on subtropical and temperate soils presented for comparison. The findings are considered within the context of the inherent properties of soils (texture and mineralogy) and their climatic constraints.

This paper is a follow-up to the oral communication presented by the authors at the 16th World Congress of Soil Science (Montpellier, France, 20-26 August 1998), entitled "Soil aggregation, soil organic matter and soil biota interactions: implications for soil fertility recapitalization in the tropics".

Cahiers Agricultures 1998 ; 7 : 357-63.

par divers auteurs [23-25]. Selon eux, la présence, à l'intérieur des agrégats, de MOP peu décomposées (donc riches en glucides et énergétiques pour les micro-organismes) permettrait une activité microbienne intense génératrice de métabolites microbiens agrégeants. Ces auteurs distinguent aussi les MOP « libres » (à l'extérieur des agrégats) ou « protégées » (au sein des agrégats) et ouvrent ainsi une voie originale pour l'étude des relations entre dynamiques de la MOS et de l'agrégation.

Un autre effet de la localisation des MOS suggère que celles-ci améliorent la stabilité des agrégats d'un alfisol brésilien en provoquant l'obstruction des pores intra-agrégats, réduisant ainsi la vitesse d'entrée de l'eau et l'importance du phénomène d'éclatement [26].

Concernant la composition de différentes classes d'agrégats, il est évident que les macroagrégats (> 200 µm), par définition, seront plus riches en débris végétaux de taille grossière que les mésoagrégats et microagrégats (< 200 µm). Au-delà de cette évidence, les résultats actuels apparaissent contra-

dictoires sur la composition en carbone (ou polysaccharides) de différentes classes d'agrégats. Ainsi, dans certains cas [3, 27], la teneur en carbone des agrégats semble indépendante de leur taille alors que, dans d'autres [28], les teneurs en carbone des agrégats seraient d'autant plus élevées que leur taille est grande. Ceci serait bien en accord avec l'hypothèse de l'intégration de débris organiques dans les macroagrégats sous l'action des activités biologiques (fauniques) et/ou lors des processus de gonflement-retrait pendant les phases d'humectation-dessiccation du sol. Sur cette question de la composition des agrégats, les recherches sont à développer, en caractérisant, en particulier, la MO des agrégats à l'aide de fractionnements granulométriques [8].

Agrégation et protection des MOS

L'amélioration de la stabilité de l'agrégation conduit à améliorer le stock organique du

sol par deux processus [6] : la diminution des pertes par érosion et la protection vis-à-vis de la minéralisation des MOS au sein d'agrégats stables. Concernant ce dernier point, des travaux [23-25] montrent que les MOP au sein des macroagrégats sont plus humifiées et plus anciennes que les MOP à l'extérieur de ces agrégats, laissant supposer un effet protecteur de l'agrégation vis-à-vis de cette forme de MOS. D'autres travaux [28] sur l'effet du labour minimum vont dans le même sens. Cette possibilité de favoriser la séquestration du carbone dans les sols en jouant sur la stabilité structurale est une voie de recherche importante pour la limitation des gaz à effet de serre.

L'amélioration de la stabilité des agrégats du sol a de nombreuses implications en termes de propriétés physiques et chimiques du sol, telles que l'infiltrabilité, l'aération (demande en oxygène), la minéralisation. Concernant cette dernière, la stabilisation des agrégats permet une protection physique des MOS contre les pertes soit par voie gazeuse (minéralisation), soit par voie solide (érosion). Le rôle des agrégats dans le stockage et la protection des MOS sera abordé dans le paragraphe suivant.

Ainsi pour un type de sol défini, le niveau du stock organique et surtout sa nature physique et biochimique et sa localisation semblent être des indicateurs de l'agrégation des sols tropicaux.

Effet des activités biologiques et interactions biologiques, organiques et minérales

Les organismes vivants du sol sont les racines, les micro-organismes (bactéries, champignons) et la faune. Tous ces organismes sont capables de créer des structures dont la taille et la composition (donc la stabilité) dépendent de la taille et du comportement de l'organisme considéré. Par ailleurs, les racines représentent une source très importante de carbone pour la faune et les micro-organismes du sol. Ceux-ci, étant en majorité hétérotrophes, ont besoin de sources diverses de MO. Le *tableau 2* donne quelques exemples des effets (positifs ou

non) des activités biologiques sur l'agrégation en mentionnant les produits organiques supposés responsables de cette agrégation.

Ainsi, concernant la faune du sol, on a montré [29, 30] que les turricules de vers de terre sont capables de stocker (et protéger) environ 20 % de carbone de plus qu'un sol non ingéré par les animaux. Ceci est attribué aux fortes teneurs en carbone et à la stabilité des turricules [31, 32]. D'autres organismes, tels les champignons, peuvent influencer l'agrégation du sol. Des filaments mycéliens contrôlent 40 % de la macroagrégation [40], ceci permettant un meilleur stockage du carbone uniquement dans des systèmes de culture utilisant le non-travail du sol.

Toutefois, les variations du niveau des activités biologiques sont souvent liées à différents modes de gestion qui se traduisent également par des variations des MOS, en quantité et qualité. Le modèle conceptuel de Tisdall et Oades [33], qui associe formes des MOS et activités biologiques selon le niveau d'organisation du sol, est un exemple de ces interactions. Il est ainsi difficile de faire la part des déterminants de l'agrégation entre des effets liés strictement aux variations de MO et ceux liés aux variations des activités biologiques. Aussi, des recherches spécifiques sont-elles à mener dans ce domaine.

Pour de nombreux auteurs, la simple mesure de la biomasse microbienne du sol total semble insuffisante pour caractériser l'effet des populations microbiennes sur l'agrégation. En effet, une des conséquences des activités biologiques sur l'agrégation est que la localisation des matières organiques responsables de l'agrégation n'est pas due au hasard ; dans une perspective de recapitalisation de la fertilité, cette propriété pourra ainsi être manipulée. Par exemple, l'utilisation de plantes à structure racinaire fine et ramifiée [34], à forte production d'exsudats, sera capable de produire des agrégats microbiens dans la rhizosphère, avec comme conséquence l'amélioration de la stabilité structurale dans la zone d'influence des racines ; cette zone devra correspondre à la couche de sol exploitée par la plante cultivée. Les racines représentent également une source d'énergie pour la faune du sol et permettront son développement et ainsi une amélioration de la structure du sol à une échelle de taille plus grande. On peut aussi gérer la couverture du sol (paillis) pour favoriser l'activité d'une macrofaune (par exemple, vers de terre) ayant des effets positifs sur la structure du sol (agrégation et porosité).

Tableau 2

Quelques exemples des effets des activités biologiques sur l'agrégation

Activités biologiques	Lieu	Type de sol	Effets sur l'agrégation	MOS concernées	Références
Rhizosphère	NZ	Inceptisol	Stabilisation des macroagrégats	Polysaccharides microbiens	[38]
Bactéries productrices d'exopolysaccharides	Mart.	Vertisol	Création d'une micro-agrégation	Polysaccharides	Achouak <i>et al.</i> (en préparation)
Bactéries et champignons	Can.	Inceptisol du nombre	Augmentation fongiques de macroagrégats	Polysaccharides essentiellement	[39]
Champignons	ÉU		Augmentation de la taille des macroagrégats	Polysaccharides fongiques	[40]
Champignons (longueur) mycélienne)	Aus.	Sandy loam	Pas d'effet	-	[18]
Racines	Mart.	Vertisol	Création d'une macroagrégation	Colloïdes organiques et débris	[13]
Vers de terre	Cl	Ultisol	Création d'une macroagrégation	-	[41]

Aus. : Australie ; Can. : Canada ; Cl : Côte d'Ivoire ; Mart. : Martinique ; NZ : Nouvelle-Zélande ; ÉU : États-Unis.

Exemples of biological influences on soil aggregation

Conséquences en termes de recapitalisation de la fertilité physique des sols tropicaux

L'agrégation contrôle l'érodibilité des sols [6], donc les pertes en MOS et en éléments nutritifs qui leur sont associés [7] avec des effets d'autant plus importants que la stabilité structurale initiale du sol sera faible. L'amélioration de la structure du sol permet également une meilleure disponibilité des cations [35], une diminution de la compaction [36], une aération adéquate du sol et une meilleure disponibilité en eau pour les plantes. Ainsi, la présence d'agrégats stables dans le lit de semences permet une bonne germination, une bonne levée et des conditions de croissance appropriées pour les plantules.

Tous les modes de gestion qui permettent à la fois une disponibilité immédiate et un stockage dans le sol des ressources nutritives pour la plante doivent être utilisés pour la recapitalisation de la fertilité des sols tropicaux. Ainsi la gestion des MOS, à partir d'intrants exogènes (pailles, fumiers, composts, etc.) et/ou endogènes (débris racinaires et produits de l'activité rhizosphérique), est un outil privilégié de cet objectif. Mais celui-ci doit être utilisé en considérant, d'une part, les interactions entre le type de sol et la dynamique de la MOS et, d'autre part, celles entre stabilité de l'agrégation et formes de MO (cf. §. Formes de MOS agrégeantes). Ainsi, sur la base des travaux de Feller [7] sur la dynamique de la MOS dans les sols à argile 1:1 montrent le rôle essentiel joué par les débris végétaux du sol dans les sols sableux et celui des MO associées aux argiles dans les sols argileux, on pourrait proposer le mode de gestion suivant des restitutions organiques au sol :

- sols sableux et sablo-argileux : gestion des débris organiques sous différentes formes, pailles, fumiers, composts ;

- sols argileux à argile 1:1 (et à argile 2:1) : gestion des activités racinaires (débris et exsudats) par des plantes de couverture et/ou des techniques agroforestières.

Mais sur la base des travaux cités à propos des formes de MO agrégantes, concernant les sols argileux à argile 1:1 et 2:1, il apparaît que ce deuxième mode de gestion est particulièrement important pour les sols à argile 2:1 dont le processus de désagrégation est lié au phénomène de dispersion, comme c'est le cas pour certains vertisols. En effet, sur la base de relations statistiques, il a été montré l'importance des MO associées aux argiles dans la limitation de la dispersion.

Dans tous les cas de figures, ces modes de gestion devront être associés à des pratiques culturales utilisant le non-travail ou un travail du sol simplifié ou réduit pour une meilleure efficacité du stockage des MOS [37]. Selon le pas de temps utilisé, les effets escomptés seront :

- à court terme, la minéralisation des MOS (et/ou des apports organiques exogènes) permettant la nutrition en N, P et éléments minéraux (K, Ca, Mg) et l'augmentation, mais temporaire, de la stabilité structurale ; ce processus est dépendant de l'accessibilité de ces substrats pour la microflore, donc de la localisation et de la qualité des MOS ;

- à moyen terme, au niveau de la parcelle, l'augmentation de la capacité de stockage de la MO dans le sol grâce au contrôle des pertes par érosion ; ce dernier processus sera d'autant moins exprimé que la stabilité de l'agrégation sera importante ;

- à long terme, la gestion raisonnée des MOS devrait induire une résilience des propriétés du sol face aux aléas climatiques.

Nouvelles recherches à mettre en œuvre

Les résultats actuels de la recherche se traduisent par des relations entre agents ou facteurs de l'agrégation et quantité d'agrégats ou distribution d'agrégats. Le sol devant être considéré comme un ensemble de classes d'agrégats, les études nouvelles concernant les processus doivent prendre en compte ces niveaux d'organisation, donc les différentes classes d'agrégats au lieu de considérer

seulement le « sol total ». Ces recherches nouvelles nécessitent, tout d'abord, une réflexion approfondie sur la définition de l'agrégat (mode d'obtention, durée de vie dans le sol, etc.) avec une attention particulière aux agrégats de taille inférieure à 200 µm et aux transferts d'échelle, par exemple, comment une activité biologique à l'échelle du micron (bactéries ou champignons), peut-elle influencer un comportement macroscopique du sol ?

Il existe un besoin de caractérisations plus fines de la qualité agrégante, de l'origine biologique et surtout de la localisation des MOS afin d'en qualifier l'impact sur les propriétés des sols. Par ailleurs, devant les résultats parfois contradictoires en la matière, il apparaît essentiel, en vue d'une gestion raisonnée de la structure, de hiérarchiser les effets des activités biologiques selon l'environnement physique, la nature et la localisation des apports organiques afin de proposer les modes de gestion les plus adaptés au milieu physique.

À la recherche des plantes « idéales » !

Le stockage des MOS, associé à une augmentation de la stabilité de l'agrégation, devrait pouvoir se faire grâce à une plante « idéale », de couverture et/ou utilisée dans les jachères améliorées, qui aurait les propriétés suivantes : croissance rapide pour une forte couverture du sol, adaptation aux milieux dégradés, structure racinaire dense, fine, ramifiée pour une exploitation maximale des premiers décimètres du sol avec une forte production d'exsudats racinaire, de type herbeuse ou arbustive, etc. ■

Références

1. Sanchez PA, Shepherd KD, Soule MJ, *et al.* Soil fertility replenishment in Africa : an investment in natural resource capital. In : Buresh *et al.*, eds. *Replenishing soil fertility in Africa*. ICRAF-SSSA Special Pub n° 51. *Soc Am J* 1997 ; 56 : 1-46.
2. Oades JM, Waters AG. Aggregate hierarchy in soils. *Aust J Soil Res* 1991 ; 29 : 815-28.
3. Albrecht A, Rangon L, Barret P. Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). *Cahiers ORSTOM, sér Pédol* 1992 ; 27 : 121-33.

4. Dalal RC, Bridge BJ. Aggregation and organic matter storage in sub-humid and semi-arid soils. In : Carter MR, Stewart BA, eds. *Structure and organic matter storage in agricultural soils, Advances in Soil Science*. Boca Raton : CRC Lewish Publ., 1996 : 263-308.

5. Albrecht A. Rôle de la matière organique et des bases échangeables dans la stabilité de l'agrégation de vertisols des Petites Antilles. *Can J Soil Sci* 1998 ; 78 (sous presse).

6. Feller C, Albrecht A, Tessier D. Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. In : Carter MR, Stewart BA, eds. *Structure and organic matter storage in agricultural soils, Advances in Soil Science*. Boca Raton : CRC Lewish Publ., 1996 : 309-59.

7. Feller C. La matière organique dans les sols tropicaux à argiles 1:1. Recherche de compartiments fonctionnels, une approche granulométrique. *Collection TDM-ORSTOM* 1995 ; 144 : 393 p. + ann.

8. Feller C, Beare MH. Physical control of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 1997 ; 79 : 69-116.

9. Douglas JT, Goss MJ. Stability and organic matter content of surface soil aggregates under different methods of cultivation and in grassland. *Soil Tillage Res* 1982 ; 2 : 155-75.

10. Haynes RJ, Beare MB. Aggregation and organic carbon storage in meso-thermal, humid soil. In : Carter MR, Stewart BA, eds. *Structure and organic matter storage in agricultural soils, Advances in Soil Science*. Boca Raton : CRC Lewis Publ., 1996 : 213-62.

11. Elustondo J, Angers DA, Laverdière MR, N'Daye gamiyé A. Étude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs ou en prairie. *Can J Soil Sci* 1990 ; 70 : 395-402.

12. Kouakoua E. *La matière organique et la stabilité structurale d'horizons de surface de sols ferrallitiques argileux. Effet du mode de gestion des terres*. Thèse Université Nancy 1, France, 1998.

13. Albrecht A. Le fractionnement granulométrique de la matière organique appliqué à la recherche de compartiments agrégants. Le cas d'un vertisol sous prairie à la Martinique. *5^{es} Journées nationales de l'étude des sols*. 22-25 avril 1996, Rennes, France.

14. Baldock JA, Kay BD, Schnitzer M. Influence of cropping treatments on the monosaccharide content of the hydrolysates of soil and its aggregate fractions. *Can J Soil Sci* 1987 ; 7 : 489-99.

15. Angers DA. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. *Soil Sci* 1992 ; 56 : 1244-9.

16. Haynes RJ, Swift RS, Stephen RC. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water-stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil Tillage Res* 1991 ; 19 : 77-87.

17. Gisman AJ, Thomas RJ. Aggregate size distribution and stability of an oxisol under legumes-based and pure grass pastures in eastern Columbian savannas. *Aust J Soil Res* 1995 ; 33 : 153-65.

18. Degens BP, Sparling GP, Abbott LK. The contribution of hyphae, roots and organic C constituents to the aggregation of a sandy loam under long-term clover-based or grass pastures. *Eur J Soil Sci* 1994 ; 45 : 459-68.

19. Kouakoua E, Sala GH, Barthes B, *et al.* La matière organique soluble à l'eau chaude et la stabilité de l'agrégation. Aspects méthodologiques et applications à des sols ferrallitiques du Congo. *Eur J Soil Sci* 1997 ; 48 : 239-47.
20. Cheshire MV, Sparling GP, Mundie CM. Effect of periodate treatment of soil on carbohydrate constituents and soil aggregation. *J Soil Sci* 1983 ; 34 : 105-12.
21. Benzing-Purdie LM, Nikiforuk JH. Carbohydrate composition of hay and maize soils and their possible importance in soil structure. *J Soil Sci* 1989 ; 40 : 125-30.
22. Angers DA, Chenu C. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. In: Lal R, *et al.*, eds. *Soil processes and the carbon cycle*. Boca Raton : CRC Press, FL, 1997 : 199-206.
23. Golchin A, Oades JM, Skjemstad JO, *et al.* Soil structure and carbon cycling. *Austr J Soil Res* 1994 ; 32 : 1043-68.
24. Golchin A, Oades JM, Skjemstad JO, *et al.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state C-13 CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Aust J Soil Res* 1994 ; 32 : 285-309.
25. Puget P, Chenu C, Balesdent J. Whole carbon and young organic carbon distribution in aggregates of silty cultivated soils. *Eur J Soil Sci* 1997 ; 46 : 449-59.
26. Caron J, Espindola CR, Angers DA. Soil structural stability during rapid wetting : influence of land use on some aggregate properties. *Soil Sci Soc Am J* 1996 ; 60 : 901-8.
27. Elliott ET, Cambardella CA. Physical separation of soil organic matter. *Agric Ecosys Environ* 1991 ; 34 : 407-19.
28. Beare MH, Hendrix PF, Coleman DC. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci Soc Am J* 1994 ; 58 : 777-86.
29. Martin A. Short-term and long-term effect of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo Megascolecidae, Oligochaeta) of a tropical savanna, on soil organic matter. *Biol Fert Soils* 1992 ; 11 : 234-8.
30. Lavelle P, Martin A. Small-scale and large scale effects of endogeic earthworms on soil organic matter dynamics in soils of the humid tropics. *Soil Biol Biochem* 1992 ; 24 : 1491-8.
31. Blanchart E. Restoration by earthworms (Megascolecidae) of the macroaggregate structure of a destructured savanna soil under field conditions. *Soil Biol Biochem* 1992 ; 24 : 1587-94.
32. Blanchart E, Bruand A, Lavelle P. The physical structure of casts of *Millsonia anomala* (Oligochaeta : Megascolecidae) in shrub savanna soil (Côte d'Ivoire). *Geoderma* 1993 ; 56 : 119-32.
33. Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stables aggregates in soil. *J Soil Sci* 1982 ; 33 : 141-63.
34. Degens BP. Macroaggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and factors affecting these : review. *Aust J Soil Res* 1997 ; 35 : 431-59.
35. Vizier JF, Tamia A, Fardoux J. Apport de l'électrodialyse à l'étude de l'influence de l'organisation du sol sur la disponibilité des éléments minéraux dans les sols tropicaux. *CR Acad Sci Paris* 1997 ; t. 321, série IIa, 1163-9.
36. Saone BD. The role of organic matter in soil compactibility : a review of some practical aspects. *Soil Tillage Res* 1990 ; 16 : 179-201.
37. Ndandou JF, Albrecht A. Early changes in soil organic matter and aggregation induced by tillage on vertisols under meadow in Martinique. *Comm. Congress ISSS*, Montpellier, France, 1998.
38. Haynes RJ, Francis GF. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrates and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *J Soil Sci* 1993 ; 44 : 665-75.
39. Chantigny MH, Angers DA, Prévost D, *et al.* Soil aggregation and fungal and bacterial biomass under annual and perennial cropping systems. *Soil Sci Soc Am J* 1997 ; 61 : 262-7.
40. Beare MB, Hu S, Coleman DC, *et al.* Influences of mycelium fungi on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. *Appl Soil Ecol* 1997 ; 5 : 211-9.
41. Blanchart E, Lavelle P, Braudeau E, *et al.* Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire. *Soil Biol Biochem* 1996 ; 29 (3/4) : 431-9.

Résumé

Dans les pays en développement des régions tropicales, la dégradation des propriétés des sols sous culture n'est pas compensée par de forts intrants qui, dans les pays développés des régions tempérées, permettent le maintien d'une production agricole élevée. Aussi, la fertilité des sols tropicaux est-elle souvent étroitement liée au niveau et à la qualité de la matière organique du sol et aux processus biologiques qui en contrôlent le stockage et les pertes.

La diminution de la productivité végétale des sols tropicaux dégradés est en partie liée à un déficit de l'alimentation hydrique et minérale des plantes cultivées, à la suite d'une dégradation des propriétés physiques. Celle-ci se manifeste par des pertes en eau et nutriments dues à l'érosion et par un mauvais développement racinaire lié à un accroissement de la compaction. Ces deux comportements physiques sont eux-mêmes déterminés par la structure des sols, dont la stabilité est fortement dépendante, pour un type de sol donné, de la matière organique du sol et des activités biologiques (microflore, racines et faune du sol).

Cette synthèse traite, pour divers sols tropicaux à argile 1:1 et 2:1, des interactions entre matière organique du sol, activités biologiques et stabilité de l'agrégation, et des implications en termes de recapitalisation de la fertilité. Les principaux lieux d'étude se situent en Afrique de l'Ouest, au Brésil, aux Antilles et dans le Sud-Est des États-Unis selon des contraintes édaphiques (texture, minéralogie) et climatiques variées. Des comparaisons avec quelques résultats en milieux sub-tropical et tempéré sont aussi présentées.

De manière générale, le niveau d'agrégation stable croît avec la teneur en argile. Toutefois pour les sols argileux, la stabilité de l'agrégation varie selon l'environnement ionique et la minéralogie et augmente des vertisols magnésio-sodiques aux vertisols calciques et aux oxisols. Enfin, pour un sol donné, et selon les contraintes édaphiques et climatiques, la gestion des stocks et des types de matières organiques et des activités biologiques des sols permet une certaine maîtrise du niveau d'agrégation des sols tropicaux.

La recapitalisation de la fertilité des sols tropicaux passe par l'amélioration de leur état physique et la gestion des matières organiques.