

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 dérochées 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

Fonds Documentaire ORSTOM



010016904

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-sesquioxydes 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 sesquioxydes 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 sesquioxydes (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].

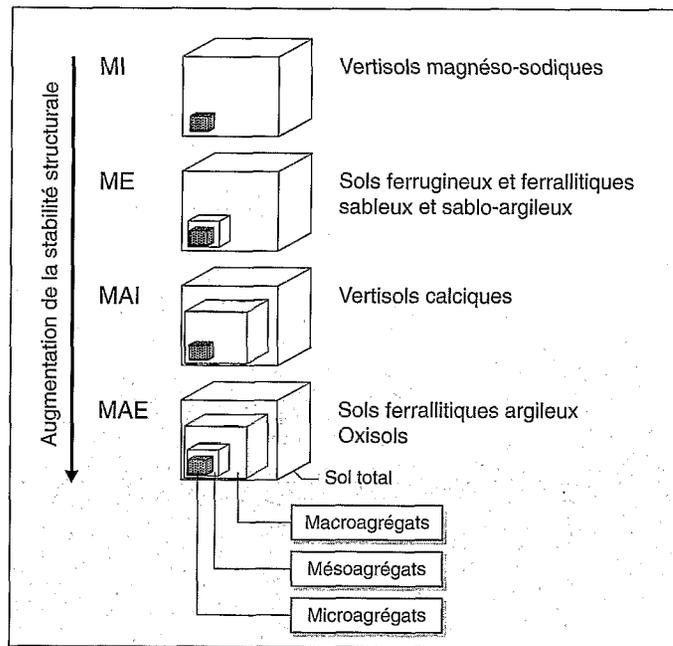


Figure 1. Mode de désagrégation dans l'eau de quelques types de sols tropicaux. MI : désagrégation du sol en microagrégats ; ME : désagrégation du sol en mésoagrégats ; MAI : désagrégation du sol en macro et microagrégats ; MAE : désagrégation du sol en macro et mésoagrégats.

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	Bésil	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 = goéthite ; 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

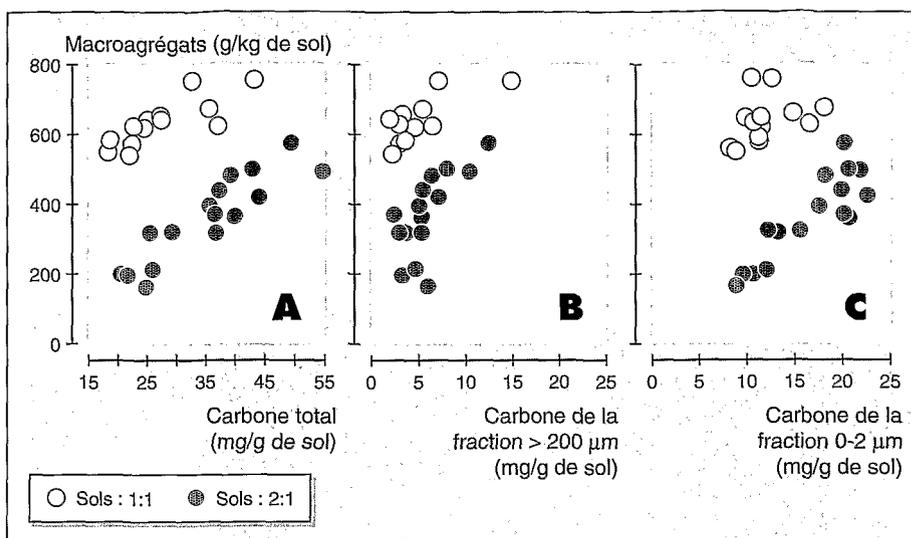


Figure 2. Relations entre la teneur en carbone (en mg C/g sol) des horizons de surface et la stabilité des agrégats. A : carbone total-macroagrégats stables dans l'eau selon la nature minéralogique des argiles ; B : carbone de la fraction > 200 µm - macroagrégats stables dans l'eau selon la nature minéralogique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

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 agrégants. 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	CI	Ultisol	Création d'une macroagrégation	-	[41]

Aus. : Australie ; Can. : Canada ; CI : 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 plantes.

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 agrégées, 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 agrégée, 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 racinaires, de type herbacé 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-SSA 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'Dayegamiye 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 agrégés. 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 peroxide 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-stable 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 Ila, 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.

Instructions aux auteurs

Les *Cahiers d'études et de recherche francophones/Agricultures*, revue bimestrielle, publie des articles originaux et des synthèses sur tous les aspects scientifiques, techniques, économiques, sociaux et organisationnels des activités agricoles au sens large, dans l'ensemble des pays de la francophonie.

La revue publiera régulièrement dans les rubriques suivantes :

- Synthèses réalisées par des spécialistes d'un sujet, faisant le point de manière précise et pédagogique sur la recherche fondamentale ou appliquée en agronomie, élevage, économie, foresterie, filières agro-alimentaires, environnement, vie rurale...
- Études originales : résultats de recherches, comptes rendus d'expériences dans les sciences et leurs applications (biologie, génétique, sol, eau, écologie, sciences de l'ingénieur, socioéconomie...), fondés sur le développement des agricultures au sens large.
- Notes de recherches : observations ponctuelles d'intérêt général ou résultats trop limités pour être publiés comme Étude originale. Les notes situent l'étude dans son contexte, exposent les faits et tirent des conclusions.
- Méthodes et Techniques sur un aspect particulier de la recherche-développement (équipements et produits, évaluation des matériels, organisation et gestion, coopérations...).
- Options : articles d'opinion sur l'environnement (forêts, déchets, eaux...) ; sur le développement (grands programmes nationaux, régionaux, internationaux de développement et politiques mises en œuvre, notamment dans le cadre des relations Nord-Sud) ; sur les ressources humaines (témoignages de terrain privilégiant le vécu)...

Les *Cahiers d'études et de recherches francophones/Agricultures* publient également des éditoriaux, des analyses d'ouvrages, des informations et des nouvelles brèves, des annonces et des comptes rendus de colloques, réunions et congrès.

Conditions de publication

Les *Cahiers d'études et de recherches francophones/Agricultures* publient préférentiellement des documents n'ayant pas fait l'objet d'une publication antérieure. Toutefois, un article dont la qualité a une valeur d'exemple peut être accepté, avec l'accord des auteurs et du directeur de la publication d'origine.

Tous les articles sont soumis à l'appréciation de deux lecteurs anonymes. En cas de litige, l'avis d'un troisième lecteur peut être demandé. Les correcteurs ou modifications sont proposées par le Comité de rédaction aux auteurs. Tous les articles acceptés pour publication bénéficient d'une assistance rédactionnelle en accord avec les auteurs. Les opinions émises sont celles des auteurs : elles n'engagent pas la responsabilité de la Rédaction.

Présentation des manuscrits

Les articles ne devront pas excéder 15 pages dactylographiées à l'exception des synthèses qui peuvent aller jusqu'à 25 pages, double interligne, 25 lignes par page, 60 signes par ligne, au recto seulement.

Les *Cahiers d'études et de recherches francophones/Agricultures* doivent pouvoir être consultés par des lecteurs anglophones et donc présenter des synthèses en anglais ainsi qu'une traduction systématique des légendes des illustrations.

Les manuscrits seront présentés de la manière suivante :

- une page de garde : titre de l'article, rubrique, titre court, titre anglais et références complètes des auteurs (fonction, raison sociale et adresse) ;
- un résumé en français de l'article (15 lignes maximum) ;
- trois à cinq mots clés réservés à l'indexation ;
- une mini-synthèse en anglais. "Abridged version" de 2 pages dactylographiées faisant référence aux tableaux, figures et photos ;
- le texte, sans illustrations ;

- les illustrations (schémas, tableaux et photographies) accompagnées de légendes détaillées et appelées dans le cours du texte ;
- des références bibliographiques (30 au maximum, 60 pour les synthèses) selon les normes définies ci-dessous ;
- des intertitres courts doivent être proposés ;
- il est souhaitable que les manuscrits acceptés soient accompagnés d'une disquette de traitement de texte, avec indication du logiciel et du système utilisé (3 pouces 1/2), accompagnée d'une sortie papier (IBM, Macintosh).

Les notes de recherches n'excéderont pas 5 pages, 6 références bibliographiques, 2 illustrations (figure, tableau ou photo) ; un résumé anglais de 10 lignes est indispensable.

Références bibliographiques

Les références bibliographiques seront classées selon leur ordre d'apparition dans le texte où elles seront appelées par leur numéro placé entre crochets. Nommer tous les auteurs lorsqu'il y en a 6 ou moins ; au-delà, indiquer les trois premiers suivis de *et al.*

Les références doivent présenter dans l'ordre :

- *Pour les articles de revues* : Noms des auteurs suivis des initiales de leurs prénoms. Titre de l'article (dans la langue d'origine). Nom de la revue abrégé et en italiques (pas de ponctuation après les abréviations) année ; volume : première-dernière page de l'article.

Exemples : 1. Casse-Delbart F, Tepfer M. Essais en champs : savoir ce que l'on transfère. *Biofutur* 1990 ; 91 : 56-9.

2. Ebert KM, Slegrath JP, DiTullio P, et al. Transgenic production of a variant of human tissue-type plasmonogen activator in goat milk : generation of transgenic goats and analysis of expression. *Bio/Technology* 1991 ; 9 : 835-8.

- *Pour les articles de livres* : Même présentation des auteurs. Titre de l'article (dans la langue d'origine). In : noms et initiales des « éditeurs ». Titre du livre en italiques. Ville : nom de l'éditeur, année de publication : première et dernière page de l'article.

Exemple : 3. Lepoivre P, Kummert J. Le diagnostic des maladies parasitaires. In : Semal J, ed. *Traité de Pathologie végétale*. Gembloux : Presses Agronomiques, 1989 : 361-79.

- *Pour les livres* : Même présentation des auteurs. Titre du livre en italiques. Ville : nom de l'éditeur, année de publication ; nombre de pages.
- Exemple : 4. Demarly Y, Sibi M. *Amélioration des plantes et biotechnologies*. Paris : John Libbey Eurotext, 1987 ; 35 p.

Illustrations

Les illustrations seront impérativement fournies sur feuilles séparées et légendées de façon détaillée en français et en anglais. Un exemplaire suffit mais le double doit être conservé par les auteurs.

Pour les documents reproduits sans modification, indiquer les références exactes (auteurs de l'ouvrage, éditeur...) afin d'en permettre la demande de reproduction.

Toutes les illustrations placées dans le texte seront numérotées en chiffres arabes (*tableau 1*) (*figure 2*) (*photo 3*) et leur place d'insertion dans le texte doit être indiquée sur le manuscrit. Veuillez indiquer au dos de chaque document : le nom de l'auteur, le numéro de l'illustration.

Manuscrits

Les manuscrits doivent être adressés à Jean Semal et Didier Spire, Rédacteurs en chef des *Cahiers Agricultures*, Éditions John Libbey Eurotext, 127, avenue de la République, 92120 Montrouge, France.

Tél. 01 46 73 06 60 Fax : 01 40 84 09 99

La rédaction remercie les auteurs de leur contribution à la revue.

Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels

André Bationo, Saidou Koala, Élias Ayuk

La productivité agricole en Afrique sub-saharienne, et spécialement en Afrique de l'Ouest, devra s'accroître substantiellement dans la prochaine décennie pour permettre d'éviter une immense crise alimentaire. Pour atteindre la sécurité alimentaire et une croissance durable, les systèmes de vulgarisation et les centres internationaux et nationaux de recherche agronomique devront multiplier leurs efforts de recherche et développement pour le transfert aux paysans de technologies à hauts rendements.

La disparité entre l'accroissement de la population et la production alimentaire est en grande partie responsable de cette situation : la population s'accroissait de 3 % par an, tandis que la quantité et la qualité des ressources naturelles et des terres cultivables par habitant déclinaient [1].

L'étendue du problème a fait l'objet de discussion à la Banque Mondiale et à la FAO. Dans un discours au Forum des chefs d'États africains en 1990, Robert McNamara a attiré l'attention sur le fait que la stagnation agricole, l'explosion démographique et la dégradation de

l'environnement sont des menaces pour la sécurité alimentaire et pour une croissance durable en Afrique.

Une agriculture extensive, sans restauration de la fertilité, a progressivement diminué l'offre alimentaire des sols africains. La FAO [2] a caractérisé « d'agriculture minière » le prélèvement continu et inexorable des éléments nutritifs du sol par les cultures, sans compensation par les engrais. Les bilans en éléments nutritifs sont donc négatifs pour plusieurs systèmes de production et la situation de l'agriculture minière en Afrique sub-saharienne est alarmante puisqu'elle prélèvera jusqu'à 22 kg de N, 6 kg de P_2O_5 et 18 kg de K_2O par hec-

tare en l'an 2000, avec une perte nette de $49 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (soit environ 9,3 millions de tonnes d'éléments nutritifs prélevés des systèmes agricoles en Afrique sub-saharienne en 1983) [2] (tableau 1).

On estime que les prélèvements annuels d'éléments nutritifs en Afrique vont atteindre $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (ou 13,2 millions de tonnes d'éléments) en l'an 2000. Au Burkina Faso, en 1983, sur un total de 6,6 millions d'hectares de superficie cultivée, les éléments prélevés représentaient une perte totale de 95 000 tonnes de N, 28 000 tonnes de P_2O_5 et 79 000 tonnes de K_2O , équivalant à 159 millions de dollars US d'engrais NPK. Au Mali, les paysans tirent en moyenne 40 % de leur

Tableau 1

Pertes en N, P et K pour quelques pays de l'Afrique de l'Ouest

Pays	Surface arable $\times 10^3 \text{ ha}$	Surface en jachère (%)	N, P, K		
			N	P	K
(kg.ha ⁻¹ de terre cultivée)					
Bénin	2 972	62	-14	-1	-10
Burkina Faso	6 691	50	-14	-2	-10
Gambie	326	29	-14	-3	-16
Mali	8 015	72	-8	-1	-6
Mauritanie	846	79	-7	0	-5
Niger	10 985	47	-16	-2	-11
Nigeria	32 813	18	-34	-4	-24
Sénégal	5 235	53	-12	-2	-10
Togo	1 503	49	-18	-2	-12

N, P, and K losses in a few West African countries

A. Bationo : IFDC/ICRISAT, BP 12404, Niamey, Niger.

S. Koala : Programme sur les zones en marge du désert, ICRISAT, BP 12404, Niamey, Niger.

E. Ayuk : ICRAF/ICRISAT, BP 320 Bamako, Mali.

Tirés à part : A. Bationo

Tableau 2

Effets des engrais N, P et K sur l'utilisation de l'eau (UE), la production de grain (P) et l'utilisation efficiente de l'eau (UEE) par le mil cultivé sur trois sites au Niger (saison culturale 1985)

Sites	Pluie (mm)	Traitements	UE (mm)	P (kg.ha ⁻¹)	UEE (kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)
Sadoré	543	Avec engrais	382	1 570	4,14
		Sans engrais	373	460	1,24
Dosso	583	Avec engrais	400	1 700	4,25
		Sans engrais	381	780	2,04
Bengou	711	Avec engrais	476	2 230	4,68
		Sans engrais	467	1 440	3,08

Effects of N, P and K fertilizers on water use (UE), grain yield (P) and water-use efficiency (UEE) for pearl millet grown at three sites in Niger (1985 cropping season)

revenu agricole de cette agriculture minière [3]. Ces données sont alarmantes, car la productivité de ces sols au départ est déjà faible à cause d'un niveau naturellement bas en éléments nutritifs. À ceci s'ajoutent une dégradation des propriétés physiques des sols et une augmentation du ruissellement et de l'érosion [4, 5].

L'Afrique sub-saharienne a le plus faible taux d'utilisation des engrais minéraux, (approximativement 10 kg d'éléments par hectare) et les ajustements structurels conduisent actuellement les gouvernements à supprimer les subventions sur les engrais, sans avoir mis en place, au préalable, des nouvelles politiques qui favoriseraient le maintien de l'utilisation d'intrants. Or ceci se fait au détriment de l'amélioration et du maintien de la fertilité des sols.

Diverses études [6] ont montré que la productivité des terres au Sahel est souvent plus limitée par la disponibilité en éléments nutritifs que par le déficit pluviométrique (tableau 2).

Par ailleurs, les mesures correctives de la fertilité chimique doivent s'effectuer en gestion intégrée avec l'utilisation des ressources minérales naturelles disponibles localement (comme les phosphates naturels par exemple) combinées au recyclage d'éléments nutritifs de sources organiques ou de sous-produits industriels.

L'accroissement de la production agricole doit impérativement passer par l'augmentation de la productivité au niveau des parcelles déjà cultivées, plutôt que par celui des superficies défrichées ou l'utilisation abusive de terres de parcours qui correspondent généralement à des

sols fragiles. Cet accroissement de la productivité peut être obtenu par l'application de technologies existantes ou en cours d'acquisition par la recherche. Une conséquence attendue des nouvelles pratiques est la régénération du couvert arbustif et arboré dont les fonctions sont essentielles : production de bois, pâturages, lutte contre l'érosion, etc.

Le problème du phosphore en Afrique de l'Ouest

Les problèmes de carence en phosphore dans la région

La carence en phosphore (P) représente une contrainte majeure pour la production agricole en Afrique de l'Ouest [7], la réponse aux engrais azotés ne devenant effective que lorsque l'eau et le phosphore ne sont plus des facteurs limitants [8]. Près de 80 % des sols de l'Afrique sub-saharienne sont carencés en phosphore. L'importance de la déficience en phosphore, l'estimation des besoins en P des principales cultures et l'évaluation de l'efficacité de différents types d'engrais phosphatés ont fait l'objet de nombreuses recherches [9-12]. Cependant, le niveau d'engrais phosphatés utilisé par les paysans reste très faible à cause du coût élevé des engrais importés. Ainsi, l'Afrique sub-saharienne utilise 1,6 kg de P/ha contre 7,9 et 14,9 pour l'Amérique

latine et l'Asie, respectivement. Il importe donc d'y valoriser au mieux l'engrais P importé ou les ressources locales de phosphates naturels.

L'augmentation de l'efficacité des engrais phosphatés

Nombre de recherches ont été menées sur l'augmentation de l'efficacité des engrais. Bationo (données non publiées) a montré que l'efficacité du phosphore est meilleure dans les systèmes de rotations céréales/légumineuses que dans la monoculture de céréales. L'application des résidus de récolte, en favorisant la complexation du fer et de l'aluminium, augmenterait de façon efficace la disponibilité du phosphore dans les sols [13]. L'effet des résidus de récolte sur l'augmentation du P prélevé par les cultures est dû aussi à l'effet des substances organiques telles que les auxines et les gibbérellines qui augmentent la densité racinaire permettant ainsi l'exploitation d'un plus grand volume de sol [14].

Les méthodes d'application du phosphore ont été depuis longtemps utilisées pour augmenter l'efficacité des engrais phosphatés. Sur des sols sableux du Niger, pauvres en matière organique (0-4 %) et en phosphore assimilable (Bray P1 = 2 mg.kg⁻¹) mais à faible pouvoir fixateur vis-à-vis du phosphore, on compare l'application à la volée et sans incorporation de P, l'application à la volée avec incorporation de P, l'application à la volée avec billonnage et le placement du phosphore dans les poquets du semis.

L'utilisation du P³² a permis de faire le bilan du P sur le mil (tableau 3).

L'application de phosphore au poquet a donné le plus bas taux de recouvrement tandis que l'incorporation et le billonnage ont conduit respectivement à des taux de recouvrement de 22 et 21 % la première année. L'utilisation du phosphore de l'engrais se situait entre 10 à 22 % la première année et 8 à 14 % la seconde année. La plus faible utilisation du phosphore en deuxième année était due à l'effet résiduel du phosphore appliqué antérieurement.

L'utilisation des phosphates naturels de la région

Il existe dans la sous-région des gisements de phosphates naturels. Les phosphates naturels de Tahoua (Niger), Parc-

Tableau 3

L'utilisation de ³²P par le mil selon différentes méthodes d'application du phosphore (P) à Sadoré au Niger (saisons culturales 1989 et 1990)

Traitements	Production (t.ha ⁻¹)				Utilisation totale (kg.ha ⁻¹)		P dérivé de l'engrais (%)		P total dérivé de l'engrais (kg.ha ⁻¹)		Utilisation du phosphore (%)	
	Épis		Paille		1989	1990	1989	1990	1989	1990	1989	1990
	1989	1990	1989	1990								
À la volée et non incorporé	1,04	1,40	2,00	1,97	7,55	7,40	46,00	33,77	3,36	2,45	15,40	12,47
À la volée et incorporé	1,13	1,58	2,39	2,13	8,10	7,91	53,42	33,53	4,37	2,70	22,24	13,78
À la volée et billonnage	1,21	1,55	2,56	2,23	9,12	7,62	46,09	37,74	4,14	2,78	21,09	14,15
Placé au poquet	0,85	1,35	2,00	1,83	4,93	5,55	42,82	28,48	2,02	1,53	10,30	7,83
Erreur standard	± 0,10	± 0,07	± 0,29	± 0,14	± 0,77	± 0,44	± 3,45	± 0,74	± 0,45	± 0,27	± 2,01	± 3,6
CV (%)	23	11	33	16	26	16	17,95	20	32	28	29	28

Use of P³² by pearl millet with different methods of P application in Sadore, Niger (1989 and 1990 cropping season)

W (Niger), Kodjari (Burkina Faso) et Tilemsi (Mali) ont été plus particulièrement étudiés. L'application directe des phosphates naturels de la région peut être une solution économique pour remplacer les engrais importés coûteux [15-19], mais leur efficacité dépend de leur composition chimique et minéralogique, qui peut être très variable (tableau 4), ainsi que des paramètres pédologiques et des systèmes de culture [19-21].

Ainsi, au Niger, les phosphates du Parc-W et ceux de Tahoua présentent respectivement une efficacité égale à 48 et 76 % de celle du superphosphate simple [7], illustrant l'intérêt de l'application directe des phosphates naturels de Tahoua [18]. Les données du tableau 5 montrent, pour les différentes zones agro-écologiques du Niger, que les phosphates naturels de Tahoua (PNT) sont aussi plus efficaces que ceux de Kodjari (PNK), aussi bien pour le mil que pour le niébé.

La faible efficacité des phosphates naturels par rapport au superphosphate simple résulte généralement de leur faible solubilité dans l'eau. L'acidification partielle des phosphates naturels permet d'améliorer leur solubilité et leur efficacité agronomique. Le coût global de l'opération (achat + traitement) est inférieur au coût de l'achat des engrais commerciaux conventionnels [22, 23]. Des essais en milieu paysan [18] ont ainsi montré que les phos-

phates naturels partiellement acidifiés du Parc-W (à 50 %) étaient aussi efficaces que les engrais minéraux phosphatés importés.

Plus récemment d'autres essais complètement gérés par les paysans ont été effectués au Mali et au Niger pour l'évaluation des phosphates de Tilemsi et de Tahoua. Nous en rapportons les résultats ci-dessous.

Essais au Mali

Trois zones agro-écologiques différentes ont été sélectionnées au Mali pour une évaluation agro-économique, en milieu paysan, des phosphates naturels de Tilemsi : Tafla dans la zone sahélienne avec une pluviométrie moyenne de 600 mm, Sougoumba dans la zone soudanienne avec une pluviométrie moyenne de 800 mm et Tinfounga dans la

Tableau 4

Composition chimique en pourcentage de quelques phosphates naturels de l'Afrique de l'Ouest

	Kpeme (Togo)	Parc-W (Niger)	Kodjari (Burkina Faso)	Tahoua (Niger)	Tilemsi (Mali)
Total P	15,7	12,4	11,1	12,2	12,5
Citrate-soluble P	1,31	1,14	0,92	1,09-2,18	1,84
CaO	51,3	40,0	33,5	39	14,4
F	4,0	3,4	3,1	2,8	3,1
Al ₂ O ₃	1,1	1,5	4,0	2,1	2,1
Fe ₂ O ₃	1,3	1,0	4,1	10,3	6,1
MgO	0,05	0,13	0,29	0,20	0,52
Na ₂ O	0,23	0,13	0,09	0,15	0,37
K ₂ O	0,04	0,13	0,043	0,12	0,1
SiO ₂	0,03	0,005	-	0,005	0,007
CO ₂	4,6	23,0	25,7	11,7	9,4
C	1,6	1,2	1,3	1,5	

Chemical composition (%) of some phosphate rocks from West Africa

Tableau 5

Efficacité agronomique relative en pourcentage des phosphates naturels de Tahoua (PNT) et de Kodjari (PNK) dans différentes zones agro-écologiques du Niger

	Sadoré		Gobéry		Gaya	
	PNT	PNK	PNT	PNK	PNT	PNK
Grains de mil	63	32	76	41	80	57
Biomasse totale du mil	65	35	60	40	68	63
Fanes de niébé	43	28	73	51	42	42
Biomasse totale du niébé	56	40	72	51	52	55

Agronomic efficiency (%) of Tahoua phosphate rock (PNT) and Kodjari phosphate rock (PNK) in different agro-ecological zones of Niger

zone Nord guinéenne avec une pluviométrie moyenne de 1 200 mm [24]. Les systèmes de cultures utilisés sont la rotation mil/arachide à Tafla, sorgho-coton à Sougoumba et maïs-coton à Tinfounga.

Les traitements utilisés sont répertoriés dans l'encadré.

Le tableau 6 donne l'effet des différentes sources d'engrais sur les rendements de l'arachide, du mil, du sorgho, du maïs et

Encadré

Évaluation des phosphates naturels : traitements utilisés

1. T1 : témoin.
2. T2 : pratique paysanne (chaque paysan applique les quantités d'engrais qu'il juge nécessaires).
3. T3 : doses d'engrais recommandées par la vulgarisation.
4. T4 : application annuelle des phosphates de Tilemsi.
5. T5 : application de fond des phosphates de Tilemsi.

Natural phosphate evaluation : used treatments

Tableau 6

Effet des différentes sources d'engrais sur les rendements (kg.ha⁻¹) de l'arachide, du mil, du sorgho, du maïs et du coton dans les différentes zones agroclimatologiques du Mali (1989-1992)

		Témoin absolu	Dose paysanne	Dose recommandée par la vulgarisation	Application annuelle du phosphate de Tilemsi	Application de fond du phosphate de Tilemsi	PPDS	CV (%)
Sougoumba								
Sorgho	1989	993	979	1 275	1 325	1 464	156	18
	1990	955	1 103	1 224	1 365	1 216	215	25
	1991	866	1 134	1 264	1 165	1 210	271	33
	1992	1 036	1 289	1 923	2 207	1 785	162	25
Coton	1989	1 121	1 351	1 645	1 610	1 691	190	17
	1990	731	1 013	1 233	1 044	1 142	174	23
	1991	1 245	1 428	1 544	1 614	1 564	152	14
	1992	931	1 120	1 307	1 354	1 514	288	18
Tafla								
Arachide	1988	775	885	844	825	775	112	19
	1990	283	334	361	338	370	67	27
	1991	499	746	591	609	577	107	26
	1992	556	583	695	564	660	109	24
Mil	1989	718	746	894	960	1 039	132	21
	1990	742	995	969	774	914	161	25
	1991	535	664	788	859	1 324	156	15
	1992	254	360	411	349	337	101	40
Tinfounga								
Maïs	1989	1 014	1 818	2 296	1 877	2 204	331	45
	1990	723	2 046	2 725	2 069	2 174	374	26
	1991	1 043	2 193	2 725	2 865	2 509	304	19
	1992	670	2 087	2 712	2 190	2 529	418	28
Coton	1989	866	1 462	1 595	1 410	1 571	165	16
	1990	1 178	1 997	2 236	2 001	1 982	201	15
	1991	436	761	1 103	954	1 116	160	25
	1992	826	1 461	1 515	1 463	1 479	194	20

PPDS : plus petite différence significative.

Effect of different sources of fertilizers on groundnut, millet, sorghum, maize and cotton in different agroclimatological zones of Mali (1989-1992)

Tableau 7

Comparaison des traitements avec les gains nets (francs CFA/ha)* pour les différents traitements d'engrais dans trois zones agro-écologiques au Mali pendant les années 1989-1992

Sites	Témoin absolu (T1)	Dose recommandée (T3)	Application annuelle du phosphate de Tilemsi (T4)	Application de fond du phosphate de Tilemsi (T5)
Sougoumba (coton-sorgho)				
Témoin absolu (T1)		130 210	145 610	142 950
Dose recommandée (T3)			15 400	12 740
Application annuelle du phosphate de Tilemsi (T4)				- 2 660
Application de fond du phosphate de Tilemsi (T5)				
Tafla (arachide-mil)				
Témoin absolu (T1)		3 840	- 24 170	11 865
Dose recommandée (T3)			- 28 010	7 845
Application annuelle du phosphate de Tilemsi (T4)				36 035
Application de fond du phosphate de Tilemsi (T5)				
Tinfouga (coton-maïs)				
Témoin absolu (T1)		319 025	224 560	278 935
Dose recommandée (T3)			- 94 465	- 40 090
Application annuelle du phosphate de Tilemsi (T4)				54 375
Application de fond du phosphate de Tilemsi (T5)				

* Tous les prix sont estimés à 5 FCFA près.
250 F CFA = 1 \$ US avant janvier 1994.

Pairwise comparison of net gains (CFA F/ha) obtained with different fertilizer treatments in 3 agroecological zones of Mali over the 1989-1992 year period

Tableau 8

Analyses économiques des différentes options de gestion des fertilités des sols à Banizoumbou et Karabedji (Niger)

Sites	Traitements	Coût des engrais (F CFA/ha)	1996			1997		
			Production grain (kg/ha)	Bénéfice net (F CFA/ha)	Rapport bénéfice/coût	Production grain (kg/ha)	Bénéfice net (F CFA/ha)	Rapport bénéfice/coût
Banizoumbou	Témoin	-	344	-	-	248	-	-
	SSP	30 000	600	38 400	1,78	396	22 200	0,74
	PRT	3 360	462	17 700	5,27	292	6 600	1,96
	PRT + SSPHP	7 940	598	38 100	4,79	295	7 050	0,89
	SSP + NAC	53 077	708	54 600	1,02	521	40 950	0,78
	SSP + NAC + CR	53 077	902	83 700	1,58	682	65 250	1,22
Karabedji	Témoin	-	550	-	-	310	-	-
	SSP	30 000	703	22 950	0,77	655	51 750	1,73
	PRT	3 360	630	12 000	3,57	372	9 300	2,77
	PRT + SSPHP	7 940	738	28 200	3,55	688	56 700	7,14
	SSP + NAC	53 077	800	37 500	0,70	787	71 550	1,34
	SSP + NAC + CR	53 077	1 264	107 100	2,02	1 548	185 700	3,49

SSP : simple superphosphate (13 kg P/ha) ; PRT : *Tahoua phosphate rock* (13 kg P/ha) ; SSPHP : *hill placement of single superphosphate* (3 kg P/ha) ; CR : *crop residue* (2 t/ha) ; NAC : nitrate d'ammonium calcique (30 kg N/ha).

Cost-effectiveness of the different fertility management options at Banizoumbou and Karabedji (Niger)

du coton. De ces données, on peut tirer les conclusions suivantes. Les différentes sources d'engrais ont généralement eu un effet significatif sur la production des cultures par rapport aux témoins T1 ; il n'y a pas de différence significative entre l'application des engrais minéraux importés (T3) et des phosphates naturels de Tilemsi (T4) ; l'application de fond (T5) n'est pas significativement supérieure à l'application annuelle (T4).

Une analyse économique montre des gains nets en comparant les traitements entre lignes et colonnes (tableau 7). À Sougoumba, l'utilisation des pratiques recommandées a permis d'obtenir des gains nets de 130 210 francs CFA.ha⁻¹ par rapport au traitement témoin tandis que les phosphates de Tilemsi (T4) donnent des gains nets de 145 610 francs CFA.ha⁻¹. En revanche à Tinfounga l'utilisation des phosphates de Tilemsi (T4) ferait perdre 94 465 francs CFA.

Essais au Niger

Des essais menés au Niger (Banizoumbou et à Karabedji) ont évalué la performance de certaines technologies de restauration de la fertilité des sols par les paysans.

Les résultats de ces essais sont rapportés dans le tableau 8. On peut en conclure que l'utilisation des engrais est plus rentable à Karabedji (pluviométrie moyenne annuelle de 560 mm) qu'à Banizoumbou

Summary

Soil fertility constraints to sustainable crop production in the Sahelo-sudanian zone: case on phosphorus and efficient use of indigenous phosphates rock

A. Bationo, S. Koala, E. Ayuk

Low erratic rainfall, high soil and air temperatures, soils with poor natural fertility, surface crusting and low water-holding capacity, are the main characteristics of the West African semiarid tropics. Present farming systems are unsustainable, relatively unproductive and detrimental to the environment. Plant nutrient balances for many cropping systems are negative, indicating that farmers are mining their soils (Table 1). Studies have shown that it is often poor plant-nutrient supplies that limit land productivity in the Sahel rather than rainfall (Table 2).

Phosphorus is one of the major constraints to crop production in West Africa. Some phosphate rocks indigenous to regions such as Tilemsi (Mali) and Tahoua (Niger) are suitable for direct application (Tables 4, 5, and 6). Partial acidulation is one way of increasing the agronomic effectiveness of local phosphate rock. Rotations of cereals with legumes, application of organic amendments (e.g. crop residue) and P fertilizer with ridging can substantially increase P efficiency. In on-farm trials carried out in Mali, net production gains obtained after the application of Tilemsi phosphate rock (Table 7) were almost as good as after application of imported water-soluble P fertilizers. In Niger, once soil fertility was restored subsequent to the application of Tahoua phosphate rock (Table 8), an additional pocket application of 3 kg P/ha of simple superphosphate gave higher benefits than conventional applications of 13 kg P/ha superphosphate.

Cahiers Agricultures 1998 ; 7 : 365-71.

(pluviométrie annuelle moyenne de 400 mm). Le bénéfice net provenant de l'utilisation des phosphates naturels est faible mais le coût associé à leur utilisation est aussi faible. Cela explique que le rapport bénéfice/coût est plus élevé qu'avec l'utilisation des autres intrants. L'utilisation des phosphates naturels de Tahoua à la volée et l'incorporation avec placement de petites quantités de superphosphate simple donnent en général des rapports bénéfice/coût plus attractifs. L'utilisation des résidus de culture comme paillis améliore beaucoup le rapport bénéfice/coût, montrant ainsi l'importance de combiner l'utilisation des engrais minéraux avec les amendements organiques.

Conclusion

La recherche en station a développé des technologies prometteuses dont une petite partie seulement atteint les agriculteurs. De plus, elles n'incorporent pas les pratiques paysannes, les réalités socio-

économiques du milieu, les priorités et perceptions des agriculteurs. Leurs points de vue ainsi que leurs connaissances traditionnelles ne sont pas pris en compte. La recherche future doit associer chercheurs, agriculteurs, agents de vulgarisation, Organismes non gouvernementaux et décideurs pour définir ensemble toutes les étapes de conception, d'exécution et d'évaluation de la recherche. Les technologies qui seront développées sous ces conditions auront le plus de chance d'être adoptées par les paysans.

Même si les agriculteurs sont convaincus des bénéfices de la restauration de la fertilité du sol, ils n'ont pas les moyens d'utiliser les engrais importés et il est donc essentiel qu'ils aient accès au crédit, en brisant le cercle vicieux, ce qui leur permettrait d'utiliser les engrais et d'accroître leurs rendements.

L'investissement dans la fertilisation des sols a des bénéfices et coûts directs et indirects. Ces derniers n'ont pas toujours été pris en compte dans l'analyse économique traditionnelle et méritent donc d'être quantifiés dans les recherches futures ■

Résumé

Une pluviométrie faible et irrégulière, une température élevée du sol et de l'air, des sols à faible fertilité, l'encroûtement des sols et une faible capacité de rétention en eau sont les principales caractéristiques des zones tropicales semi-arides de l'Afrique de l'Ouest. Les systèmes actuels de production sont non soutenables, faibles en productivité et destructifs de l'environnement, la plupart ayant un bilan négatif en éléments nutritifs, indiquant la pratique d'une agriculture minière.

Le plus souvent, la basse fertilité des sols limite davantage que la pluviométrie la production agricole au Sahel.

L'application directe de phosphates naturels de Tilemsi (Mali) et Tahoua (Niger) améliore la production et l'acidification partielle augmente de façon très significative l'efficacité agronomique du phosphate de Kodjari ou du Parc de W.

Des essais en milieu paysan ont permis de conclure, au Mali, que l'utilisation des phosphates de Tilemsi permet des gains nets comparables à ceux obtenus avec les phosphates solubles à l'eau. Au Niger, une fois la fertilité des sols restaurée par l'application des phosphates de Tahoua, l'addition au poquet de l'équivalent de 3 kg P/ha de superphosphate simple permet d'obtenir les rapports bénéfices/coûts les plus élevés par rapport à la dose traditionnellement recommandée de 13 kg P/ha de superphosphate. La rotation céréales/légumineuses, l'application d'amendements organiques tels que les résidus de cultures ainsi que l'application de phosphore suivi de billonnage permettent d'augmenter de façon très significative l'efficacité des engrais phosphatés. Cependant, le plus souvent les paysans ne disposent pas des crédits nécessaires pour se procurer ces intrants externes. L'identification des contraintes socio-économiques, l'adoption de ses intrants externes et l'amélioration de l'environnement politique sont requis pour assurer la fertilisation durable des sols de l'Afrique de l'Ouest.

Références

1. IFPRI. *A 2020 vision for food, agriculture and the environment: the vision, challenge and recommended action*. Int. Food Policy Res. Inst., Washington, D.C., 1995 ; 50 p.
2. Stoorvogel JJ, Smaling EMA. *Assessment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa, 1983-2000*. Report 28, DLO Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Wageningen, Netherlands, 1990 ; 137 p.
3. Van der Pol F, Van der Geest N. *Economics of the nutrient balance, in agriculture, economics, and sustainability in the Sahel*. In : Hujsman, Van Tilburg, eds. Amsterdam, Royal Tropical agriculture, 1993 ; 41-112.
4. Vlaar JCJ, Wesselink AJ. *Aménagement de conservation des eaux et des sols par digues filtrantes*. Commission des Communautés Européennes, 1990.
5. Buerkert A. Effects of crops residues, phosphorus and spatial variability on yield and nutrient uptake of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) in Southwest Niger. Diss. Universität Hohenheim. In : Ulrich E, ed. Grauer. Stuttgart : Verlag, 1995 ; 272 p.
6. Bationo A, Biolders CL, Van Duivenbooden N, Buerkert AC, Seyni F. The management of nutrients and water in the West African semi-arid tropics. In : *Management of nutrients of water in rainfed and semi-arid areas*. Proceedings of a consultant meeting organized by the joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture IAEA-Ted donc-1026, 1998 ; 15-35.
7. Bationo A, Chien SH, Mokwunye AU. Chemical characteristics and agronomic values of some phosphate rocks in West Africa. In : Menyonga JMT, Bezuneh, Youdeowwei A, eds. *Food grain production in semi-arid Africa*. SAFGRAD Coordination office. DAU/SAFGRAD, Essex, UK, 1987 ; 399-407.
8. Traore MF. Étude de la fumure minérale azotée intensive des céréales et du rôle spécifique de la matière organique dans la fertilité des sols au Mali. *Agron Trop* 1974 ; 5 : 567-86.
9. Bouyer S. *L'emploi des phosphates naturels de Thiès dans l'agriculture sénégalaise*. Compte rendu, 2nd Conf. InterAfr. des Sols. Léopoldville, 1954 ; 19-35.
10. Goldsworthy PR. Responses of cereals to fertilizers in Northern Nigeria I. *Sorghum Expl Agric* 1967 ; 3 : 29-40.
11. Goldsworthy PR. Responses of cereals to fertilizers in Northern Nigeria II. *Maize Expl Agric* 1967 ; 3 : 263-8.
12. Pichot J, Roche P. Le phosphate dans les sols tropicaux. *Agron Trop* 1972 ; 27 : 939-65.
13. Bationo A, Buerkert A, Sedogo MLP, Christianson BC, Mokwunye AU. A critical review of crop residue use as soil amendments in the West African semi-arid tropics. In : Powell M, Fernandez S, Williams TO, Renard C, eds. *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa*. II. Technical papers. Proceedings International Conference, Addis Abeba, Ethiopia, 22-26 Nov. 1993. Addis Abeba, Ethiopia : ILCA, 1995 : 305-22.
14. Hafner H, George E, Bationo A, Marschner H. Effect of crop residues on root growth and nutrient acquisition of pearl millet in an acid sandy soil in Niger. *Plant and Soil* 1993 ; 150 : 117-27.
15. Jones MJ. *A review of the use of rock phosphate as fertilizer in francophone West Africa*. Samaru Misc. Paper 43. Institute for Agricultural Research. PMB 1044 Zaria, 1973.
16. Mokwunye AU. Phosphorus fertilizers in Nigeria savannah soils. II. Evaluation of three phosphate sources applied to maize at Samaru. *Trop Agric (Trinidad)* 1979 ; 56 : 65-8.
17. Thibaut F, Traoré MFC, Pichot J. L'utilisation agricole des phosphates naturels de Tilemsi (Mali). Synthèse des résultats de la recherche agronomique sur les cultures vivrières et oléagineuses. *Agron Trop* 1980 ; 35 : 240-9.
18. Bationo A, Chien SH, Christianson CB, Henao J, Mokwunye AU. A three year evaluation of two unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to Niger. *Soil Sci Soc Am J* 1990 ; 54 : 1772-7.
19. Kasawneh FE, Doll EC. The use of phosphate rock for direct application. *Adv Agron* 1978 ; 30 : 159-206.
20. Lehr JR, McClellan GH. *A revised laboratory reactivity scale for evaluating phosphate rocks for direct application*, Bulletin 43, Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, 1972.
21. Chien SH, Hammond LL. A simple chemical method for evaluating the agronomic potential of granulated phosphate rock. *Soil Sci Soc Am J* 1978 ; 42 : 615-7.
22. Hammond LL, Chien SH, Mokwunye AU. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Adv Agron* 1986 ; 48 : 89-140.
23. Schultz JJ. *Sulfuric acid-based partially acidulated phosphate rock. Its production cost and use*. Techn. Bul. T-31. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL, USA, 1986.
24. Bationo A, Ayuk E, Ballo D, Kone M, Agronomic and economic evaluation of Tilemsi phosphate rock in different agroecological zones of Mali. *Nutrient Cycling in Agrosystems* 1997 ; 48 : 179-89.

Effet de NaCl sur la croissance et la respiration racinaire du triticale (*X-Triticosecale* Wittmack)

Najoua Bouraoui, Claude Grignon, Ezzeddine Zid

Dans de nombreuses régions du monde, la salinité est une contrainte majeure qui limite la productivité agricole [1]. Identifier et comprendre les mécanismes de la tolérance des plantes à ce facteur présente un intérêt potentiel évident dans une optique d'aide à l'amélioration variétale. NaCl inhibe la croissance racinaire des glycophytes, qu'elles soient réputées très sensibles à la salinité [2], moyennement sensibles [3, 4], ou plutôt tolérantes [5]. Néanmoins, cette inhibition est généralement moins marquée que celle des parties aériennes [6, 7].

La racine reçoit par le phloème les assimilats produits dans les feuilles, peu de temps après leur biosynthèse. Chez le blé, la défoliation entraîne en moins de 90 minutes une baisse des sucres solubles et de la respiration de l'apex racinaire, ainsi qu'un ralentissement de l'élongation [8]. Le flux descendant de glucides et l'accumulation des sucres réducteurs dans la racine contrôlent l'intensité respiratoire de cet organe [9, 10] ainsi que sa croissance [11]. Deux

types de respiration peuvent être distingués : la respiration liée à la croissance et la respiration d'entretien qui fournit l'énergie nécessaire au maintien des structures cellulaires et au déroulement des transports ioniques [12]. C'est elle qui prédomine en conditions de contraintes environnementales fortes. Il a été montré que la respiration des racines de *Ficus indica*, exposées à NaCl 100 mmol, est plus élevée que celle des racines témoins, tandis que la croissance racinaire est diminuée [13]. La respiration racinaire de la variété tolérante d'orge California Mariot augmente de 50 % en présence de NaCl ou KCl 10 mmol, alors que la respiration de la variété Arivat, sensible au sel, est doublée [14].

Une proportion élevée des assimilats transférés aux racines stressées semble être utilisée dans les processus énergétiques nécessaires à l'ajustement osmotique aux fortes salinités. Toutefois, les réponses métaboliques de douze espèces ne montrent pas de stimulation de la respiration racinaire par le sel, sauf pour les racines du pois [15]. Chez la tomate [16], le soja [17], le maïs [18] et le plantain [19], on observe une diminution de la respiration racinaire en présence de sel tandis que, chez d'autres espèces, la respiration est insensible au sel [20].

Le triticale présente une tolérance notable à la salinité, et ses racines conservent, en présence de sel, une bonne aptitude à assurer la nutrition minérale de la plante [21-24]. Dans le but de mieux comprendre le rôle du système racinaire

du triticale dans la tolérance au sel, nous avons étudié l'effet de NaCl sur la croissance et le métabolisme respiratoire de la racine pendant les 15 premiers jours qui suivent la germination, phase qui correspond à la mise en place rapide du système végétatif.

Matériel et méthodes

Matériel végétal et conditions de culture

Des plantules de triticale (*X-Triticosecale* Wittmack), âgées de 3 jours (stade 1 feuille émergée du coléoptile), sont cultivées sur des cristallisoirs de 2 litres contenant une solution nutritive liquide. Le milieu de base contient des macro-éléments (en mmol) : K⁺ (1,5) ; Ca²⁺ (1,75) ; Mg²⁺ (0,5) ; NO₃⁻ (4) ; H₂PO₄⁻ (0,5) ; HPO₄²⁻ (0,25) ; SO₄²⁻ (0,5) ; et des oligo-éléments (en ppm) : Fe (1,4) ; Mn (0,25) ; B (0,16) ; Cu (0,03) ; Zn (0,03) ; Mo (0,01). Ce milieu est éventuellement complété par NaCl, de manière à obtenir des concentrations comprises entre 50 et 200 mmol. L'addition de NaCl est faite progressivement à raison de 50 mmol par jour afin de minimiser le choc osmotique. Les milieux de culture sont aérés en permanence et renouvelés tous les 3 jours. La photopériode est de 16 h et l'intensité lumineuse de 40 W/m². L'humidité relative et la température sont respectivement de 55 % et 30 °C le jour, et de 90 % et 22 °C la nuit.

N. Bouraoui, E. Zid : Laboratoire de physiologie et écophysiologie végétales, Faculté des sciences de Tunis, Campus universitaire, 1060 Tunis, Tunisie.

C. Grignon : Biochimie et physiologie moléculaire des plantes. INRA, CNRS (URA 2133), École nationale supérieure agronomique, place Viala, 34060 Montpellier cedex 1, France.

Tirés à part : N. Bouraoui

Agricultures

Dossier
Fertilité des sols et environnement :
quelques outils, indicateurs
et approches récentes - II
Coordination : Christian Feller

Éditorial

Biosphère-
Anthroposphère :
zéro à zéro
J. Semal

Dossier

- Spatialisation des stocks d'éléments dans les sols : cas du carbone organique
D. Arrouays, M. Bernoux, C. Jolivet
- Déterminants organiques et biologiques de l'agrégation des sols tropicaux
A. Albrecht, D. A. Angers, M. H. Beare, E. Blanchart
- Fertilité des sols, production céréalière et phosphates naturels : l'exemple sahélo-soudanien
A. Batiano, S. Koala, E. Ayuk

Étude originale

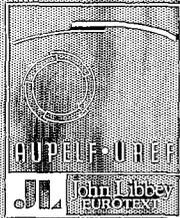
Effet de NaCl sur la croissance et la respiration racinaire du triticales
N. Bouraoui, C. Grignon, E. Zid

Synthèse

Qualité de l'atmosphère à proximité des bâtiments d'élevage
A. Marquis, P. Marchal

Notes de recherche

- Gestion de la fertilité et évolution des sols de Gakudi (Niger)
J.-M. Karimou Ambouta, I. Amadou, I. Souley
- Morphologie comparée de grains de pollen chez *B. juncea*, *B. nigra* et *B. rapa*
H. Zhou, L. Greffier, J.-P. Maitre
- Adaptation des provenances d'*E. urophylla* (Congo)
R. Gouma
- Tolérance à l'acidité *in vitro* de rhizobia isolés de *V. unguiculata* en comparaison avec *B. japonicum* (Cameroun)
D. Nwaga, L. Ngo Nkot



Prix du numéro :
120 FF pays
du Nord
160 FF pays
du Sud

Le clonage des mammifères - A. Burny - J.-P. Renard

Cahiers

Agricultures

Revue co-éditée en partenariat, dans le cadre des programmes de l'Université de réseaux d'expression française, par l'Aupelf-Uref (Agence francophone pour l'enseignement supérieur et la recherche) et les éditions John Libbey Eurotext.

John Libbey Eurotext Limited
127, av. de la République
92120 Montrouge, France
Tél. (33) 01 46 73 06 60
Fax : (33) 01 40 84 09 99
e-mail : marketing@jle.com
redaction@jle.com
http://www.john-libbey-eurotext.fr

Directeur de la publication
Gilles Cahn

Rédacteurs en chef
Jean Semal (Gembloux)
Didier Spire (Versailles)

Comité de rédaction
A.J. Akakpo (Dakar); T. Ameziane El Hassani (Rabat); G. Courade (Paris); F. Delpeuch (Montpellier); A. Deshayes (Tours); P. Feuilloley (Montpellier); D. Godard (Paris); F. Guessous (Rabat); J.-L. Guillaumet (Paris); J. Hardouin (Gembloux); L.-M. Houdebine (Jouy-en-Josas); R. Lannoye (Bruxelles); M. Larbier (Paris); D. Petitclerc (Lennoxville); C. Raichon (Versailles); F. Rapilly (Chaville); M. Robert (Versailles); C. Silvy (Montpellier)

Comité scientifique
Président d'honneur
L. Malassis (Montpellier)
Président
A. Conesa (Montpellier)

M. Allaya (Montpellier); J.-M. Barbier (Montpellier); M.-F. Chevallier (Paris); F. Challot (Montpellier); J.-P. Chauveau (Montpellier); S. Dautrebande (Gembloux); G. Debailleul (Laval); J.-P. Deffontaine (Versailles); P.E.H. Diop (Dakar); A. Dewaele (Liège); M.M. Fassi-Fehri (Rabat); C. Férault (Paris); M. Griffon (Montpellier); J.-P. Guyot (Montpellier); M. Hamze (Beyrouth); E. Landais (Paris); G. Lemaire (Lusignan); P. Lhoste (Montpellier); J. Mamy (Versailles); M. Mazoyer (Paris); J.-L. Notheguem (Montpellier); E. Picart (Orsay); J. Pichot (Montpellier); A. Ruellan; H. Saint-Macary (Montpellier); A. Sasson (Paris); M. Sedrati (Rabat); A. Sere (Dakar); D. Thé Tuan (Hanoi)

Membres correspondants
A. Abdelguerfi (Alger); A. Adoum Doutoum (N'Djamena); Z. Bouznad (Alger); A. Charrier (Montpellier); G. Devauchelle (Saint Christol-Les-Alès); M. Diouf (Niamey); M. Fall (Thiès); B. Jean (Rimouski); M. Kahungu (Lubumbashi); A. Kalonji-Mbuyi (Kinshasa); A.O. Limane (Nouakchott); F. Malaisse (Gembloux); K.B. Me (Yamaoussoukko); J. Meunier (Montpellier); S. Ndembou (Yaoundé); A.M. Osman (Rédut); S. Ouattar (Rabat); E. Persoons (Louvain-La-Neuve); J. Rondeux (Gembloux); L.L. Sawadogo (Ouagadougou); T. Tran Thuong (Can Tho); A.S. Traoré (Ouagadougou)

340 Dans ce numéro...

Didier Spire

Éditorial

343 Biosphère – Anthroposphère : zéro à zéro

Jean Semal

Dossier :

346 Fertilité des sols et environnement : quelques outils, indicateurs et approches récentes – II

Coordination : Christian Feller

347 Spatialisation des stocks d'éléments dans les sols Outils actuels et potentialités : cas du carbone organique

Dominique Arrouays, Martial Bernoux, Claudy Jolivet

357 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

365 Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels

André Bationo, Saidou Koala, Élias Ayuk

Étude originale

372 Effet de NaCl sur la croissance et la respiration racinaire du triticale (*X-Triticosecale* Wittmack)

Najoua Bouraoui, Claude Grignon, Ezzeddine Zid

Synthèse

377 Qualité de l'atmosphère à proximité des bâtiments d'élevage

Alfred Marquis, Philippe Marchal

Contrepoints Agricultures

387 Le clonage des mammifères

Arsène Burny – Jean-Paul Renard

Notes de recherche

395 Gestion de la fertilité et évolution des sols de Gakudi (Maradi, Niger)

Jean-Marie Karimou Ambouta; Issaka Amadou, Issa Souley

401 Morphologie comparée de grains de pollen chez *Brassica juncea* (L.) Czern. et Coss., *Brassica nigra* (L.) Koch, et *Brassica rapa* L.

He Zhou, Laurent Greffier, Jean-Paul Maitre

403 Adaptation des provenances d'*Eucalyptus urophylla* au Congo

Raphaël Gouma

407 Tolérance à l'acidité *in vitro* de rhizobia isolés de *Vigna unguiculata* au Cameroun en comparaison avec *Bradyrhizobium japonicum*

Dieudonné Nwaga, Laurette Ngo Nkot

394 Actualités des réseaux

400 Congrès

410 Analyses d'ouvrages

411 Brèves

L'**Éditorial** de *J. Semal* replace nos agricultures entre l'environnement matériel et celui créé par l'homme. Une réflexion sur les solidarités nécessaires en Francophonie est illustrée par deux exemples bien choisis : les accords de Lomé et l'impact international des biotechnologies.

La seconde partie du **Dossier** sur la fertilité des sols et l'environnement est présentée dans ce numéro, à la suite du 16^e Congrès mondial des sciences du sol qui s'est tenu à Montpellier en août 1998. Le coordonnateur de cet ensemble, Christian Feller, présente en introduction les trois articles qui le composent.

Une **Étude originale** traite de la tolérance à la salinité. Dans de nombreuses régions, la salinité entrave le développement agricole. Le triticale présente une certaine tolérance. Les auteurs, *N. Bouraoui*, *C. Grignon* et *E. Zid*, étudient l'effet du sol sur le métabolisme des racines de cette plante pour mieux en comprendre le comportement.

Une **Synthèse** sur la qualité de l'atmosphère autour des bâtiments d'élevage d'*A. Marquis* et *P. Marchal* décrit les différentes pollutions issues des déjections animales et situe les recherches menées pour réduire ces nuisances. Des recettes existent mais bien d'autres sont encore à mettre en place pour trouver des solutions économiquement acceptables.

Ce numéro présente le compte rendu de la conférence des « **Contrepoints Agricoles** » sur le clonage des mammifères qui a eu lieu 10 septembre à l'INA PG (Grignon) dans le cadre d'INNOV-AGRI et en partenariat avec la faculté de Gembloux. Les deux conférenciers, A. Burny (Gembloux) et J.-P. Renard (INRA, Jouy-en-Josas) ont présenté des points de vue techniques et éthiques sur ce sujet d'actualité.

Quatre **Notes de recherche** clôturent ce numéro.

J.-M. Karimou Ambouta, *I. Amadou* et *I. Souley* traitent de la gestion de la fertilité et de l'évolution des sols dans une zone du Niger. C'est une illustration du dossier sol traité dans ce numéro.

H. Zou, *L. Greffier* et *J.-P. Maitre* comparent des graines de pollen de deux *Brassica*, recherchant une amélioration génétique par tétraploïdisation et observent que l'augmentation de dimension des graines de pollen, associée à une fréquence significative des graines à quatre spores, permet une identification des diploïdes.

R. Gouma étudie le comportement d'un eucalyptus au Congo de provenance indonésienne. Il observe une adaptation et une forme de ces arbres en étroite relation avec l'origine des semences importées.

Enfin, *D. Nwaga* et *L. Ngo Nkot* comparent l'activité de diverses souches de rhizobium en milieu acide. Ils observent une tolérance variable vis-à-vis de cette acidité, résultats à prendre en compte pour une production de biofertilisants pour légumineuses.

Didier Spire
Rédacteur en chef

Cahiers
Agricultures

Dessins
Logigraphe Communication
77, rue Brancion
75015 Paris

Couverture
L'atelier graphique/Pierre Fauchoux
10 ter, rue Bisson
75020, Paris

Abonnements
3, av. Pierre-Kerautret
93100 Romainville, France
Tél.: (33) 01 48 40 86 86
Fax: (33) 01 48 40 07 31

CORLET, IMPRIMEUR, S.A.
Z.I. route de Vire
14110 Condé-sur-Noireau
N° 34242

Les Cahiers Agricultures sont référencés
dans les bases Agris, Resagri, Agritrop,
Pascal, Orchis, CAB (Commonwealth
Agricultural Bureaux).

ISSN : 1166-7699
Commission paritaire 73752 GB
Bimestriel (6 numéros par an)

Copyright © « Les Cahiers d'Études et de
Recherches Francophones/Agricultures ». Tous
droits de reproduction par tous procédés réservés
pour tous pays.

Index des annonceurs
John Libbey Eurotext:
342, 2^e de couv., 3^e de couv., 4^e de couv.
Bulletin d'abonnement: 386

Instructions aux auteurs: 364

Secrétariat général de la rédaction
Catherine Lavaud

Secrétariat de rédaction
Anne Coche

Responsable marketing
Valérie Parroco

Secrétariat
Nathalie Trinanes

Ont collaboré à ce numéro :
Thomas Schmutz
David Manley, Isabelle Reboulet

Contents

340 In this issue...

Didier Spire

Editorial

343 Biosphere Anthroposphere: zero to zero

Jean Semal

Dossier:

346 Soil fertility and the environnement: some recent tools, indicators and strategies – II

Coordinator: Christian Feller

347 Spatialisation of element reserves in soil

Present tools and perspectives: the organic carbon case

Dominique Arrouays, Martial Bernoux, Claudy Jolivet

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

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

365 Soil fertility constraints to sustainable crop production in the Sudano-Sahelian zone: case study on phosphorus and efficient use of indigenous phosphates rock

André Bationo, Saidou Koala, Élias Ayuk

Original study

372 Effect of NaCl on root growth and root respiration in triticale (*X-Triticosecale* Wittmack)

Najoua Bouraoui, Claude Grignon, Ezzeddine Zid

Review article

377 Atmospheric quality around animal buildings

Alfred Marquis, Philippe Marchal

Counterpoint issues in agriculture

387 Clonage of mammifers

Arsène Burny – Jean-Paul Renard

Research notes

395 Soil fertility changes and management in Gakudi (Maradi, Niger)

Jean-Marie Karimou Ambouta, Issaka Amadou, Issa Souley

401 Comparative study of pollen morphology in *Brassica juncea* (L.) Czern. and Coss., *Brassica nigra* (L.) Koch, and *Brassica rapa* L.

He Zhou, Laurent Greffier, Jean-Paul Maitre

403 Adaptation and form of some *Eucalyptus urophylla* local populations in Congo

Raphaël Gouma

407 *In vitro* acidity tolerance of rhizobia isolated from *Vigna unguiculata* in Cameroon in comparison to *Bradyrhizobium japonicum*

Dieudonné Nwaga, Laurette Ngo Nkot

394 Network news

400 Congresses

410 Book review

411 Short communications

