

Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso

Boubié Vincent Bado, Michel Papdoba Sédogo,
Michel Pierre Cescas, François Lompo, André Bationo

La faible fertilité des sols de l'Afrique subsaharienne est l'une des contraintes qui limitent la production agricole et qui justifient l'efficacité des engrais minéraux sur les rendements des cultures. Cependant, si les engrais minéraux sont généralement efficaces pendant les premières années de culture, on observe, après cinq à dix années d'apports continus de fumures exclusivement minérales, une baisse des rendements [1, 2, 11]. Outre les éléments nutritifs qu'il apporte, l'engrais minéral modifie certaines propriétés physico-chimiques du sol. Les engrais minéraux azotés sont notamment acidifiants. Une forte acidité peut réduire la disponibilité en éléments nutritifs et induire des toxicités en aluminium (Al^{3+}) ou en manganate (Mn) provoquant une baisse des rendements. Le niveau de la matière organique du sol est un facteur important de maintien de la fertilité tandis que l'efficacité des engrais minéraux semble liée à la quantité de matière organique présente dans le sol [2].

Dans l'optique d'une gestion durable de la fertilité du sol, l'efficacité des fumures doit être évaluée selon leur capacité à augmenter durablement les rendements agricoles. Cette étude se propose d'évaluer les effets à long terme des engrais minéraux sur les propriétés physico-chimiques du sol et leurs conséquences sur les rendements d'une culture de maïs.

Matériel et méthode

L'expérience a été réalisée sur un sol ferrallitique à la station de recherche agronomique de Farakô-ba (Burkina Faso). Les caractéristiques physico-chimiques du sol sont présentées sur les *tableaux 1* et *2*. La variété de maïs améliorée IRAT 171 a été utilisée en culture continue. L'étude a été réalisée par une expérimentation de longue durée installée depuis 1983 sur un sol resté en jachère pendant huit ans. Le dispositif expérimental était celui des blocs de Fisher comprenant quatre traitements et six répétitions. Dans chaque bloc, les traitements sont distribués de façon aléatoire. Chaque parcelle élémentaire mesure 4 m sur 12 m (48 m²). Les traitements comparés sont : le témoin non fertilisé (Tém), l'engrais minéral (FM), le fumier seul (FO) et la fumure organominérale (FMO) associant l'engrais minéral et le fumier. À l'image des systèmes traditionnels de production, les résidus de tiges lignifiées sont exportés. Le fumier est apporté tous les deux ans pendant le labour à la dose de 5 t/ha. Il s'agit d'un fumier d'étable dosant 20 % de carbone et

1,8 % d'azote avec un rapport C/N de 11. La FM correspond à la fumure vulgarisée en culture intensive sur le maïs, avec 90 kg/ha d'azote (N), 15 kg/ha de phosphore (P), 42,5 kg/ha de potassium (K), 9 kg/ha de soufre (S) et 1,5 kg/ha de bore (B). Les éléments N, P, K, S et B sont apportés aux doses respectives de 14 - 10 - 11,6 - 6 - 1 par un engrais composé ne contenant ni calcium (Ca) ni magnésium (Mg). Les doses d'azote et de potassium ont été complétées avec de l'urée et du chlorure de potassium. Le phosphore, le potassium, le soufre, le bore et 1/4 de l'azote sont appliqués au semis. Les fractions complémentaires d'azote ont été appliquées à 30 jours (1/2 du N total) et 60 jours (1/4 du N total) après le semis. Les parcelles ont été chaulées après neuf années de culture (1992) avec de la chaux agricole dosant 98 % CaO. Les quantités de chaux ont été calculées sur la base des quantités nécessaires pour neutraliser l'aluminium échangeable mesuré dans chaque parcelle en utilisant l'équation de Kamprath [3]. Les prélèvements d'échantillons de terre pour les analyses sont effectués dans le profil cultural (0-15 cm).

Analyses de laboratoire

Le pH à l'eau est dosé dans un mélange sol/solution de 1/1, après un temps d'équilibrage de une heure. Le pH-KCl est dosé sur une suspension de sol selon un rapport sol/solution de 1/2,5, dans laquelle on rajoute du KCl normal et après un temps d'équilibre de 30 minutes. L'acidité d'échange a été mesurée après déplacement des ions acides (H^+ et Al^{3+}) avec du

B.V. Bado : INERA, Station de Farakô-ba, BP 910, Bobo Dioulasso, Burkina Faso.
M.P. Sédogo : INERA, BP 7192, Ouagadougou, Burkina Faso.
M.P. Cescas : Département des sols, FSAA, Université Laval, Québec G1K 7P4, Canada.
F. Lompo : INERA, BP 7192, Ouagadougou, Burkina Faso.
A. Bationo : IFDC/ICRISAT, BP 12404, Niamey, Niger.

Tirés à part : B.V. Bado

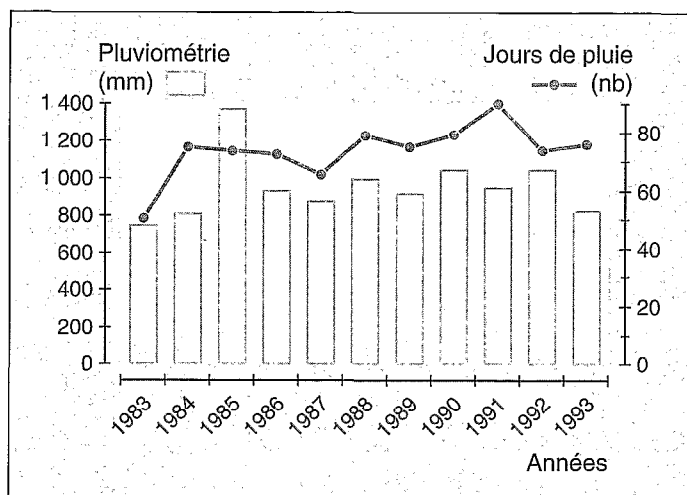


Figure 1. Pluviométrie annuelle et nombre de jours de pluie durant la période d'expérimentation.

Figure 1. Annual rainfall and number of rainy days during the experimentation period.

KCl normal [4]. Les bases échangeables (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+) ont été extraites à l'acétate d'ammonium à pH 7 [5] et dosées par spectrophotométrie de flamme. L'aluminium est extrait au KCl et dosé par spectrophotométrie de flamme. La capacité d'échange cationique effective (CEC) a été estimée en considérant que la somme des bases échangeables et l'acidité d'échange occupent l'ensemble des charges négatives responsables du pouvoir d'échange ionique du sol [4]. Le carbone organique est dosé selon la méthode Walkley-Black modifiée. Le phosphore est dosé par la méthode Bray I [6].

Résultats

Pluviométrie et évolution des rendements

La pluviométrie annuelle et le nombre de jours de pluie sont présentés dans la figure 1. La pluviométrie a été relativement stable tant pour les quantités d'eau recueillie que pour le nombre de jours de pluie. Par rapport à la moyenne pluviométrique des onze années étudiées, seule l'année 1985 a été exceptionnellement pluvieuse (figure 1). Malgré cette stabilité relative de la pluviométrie, il y a une grande variation des rendements dans le temps et l'on distingue globalement trois phases (figure 2).

Une augmentation générale des rendements se produit durant une première période de trois à quatre années par l'apport d'engrais minéral dont l'efficacité augmente quand il est combiné au fumier. À cette première phase succède une deuxième phase de quatre à six années durant laquelle les rendements diminuent pour tous les traitements. Cette baisse est plus ou moins rapide selon les fumures, la chute étant particulièrement rapide avec la FM. Après chaulage, les rendements augmentent de nouveau, surtout pour FM et FMO.

Acidité et aluminium échangeable du sol

Avant l'apport de chaux, toutes les fumures diminuent le pH du sol (tableau 1), la FM entraînant la plus forte baisse du pH (-1 unité). L'engrais minéral augmente aussi l'aluminium (Al) et l'acidité d'échange. L'effet acidifiant de

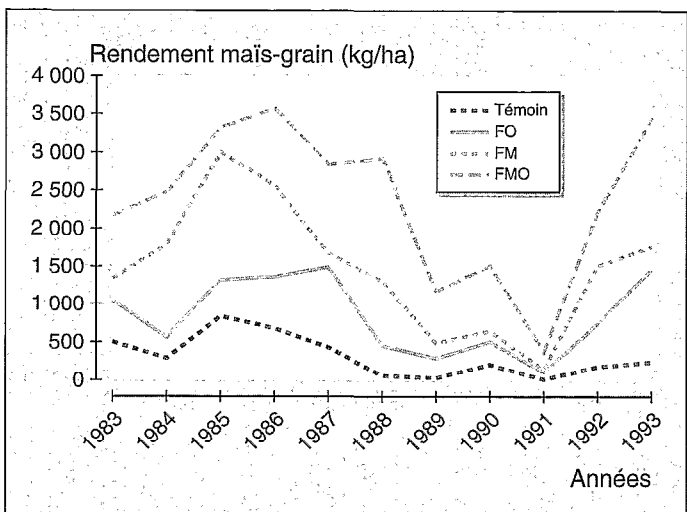


Figure 2. Effets de différentes fumures pendant onze années de culture (1983-1993) et influence d'un chaulage appliqué en 1992 sur les rendements du maïs.

FO : fumier ; FM : fumure minérale ; FMO : fumure organo-minérale (FO + FM).

Figure 2. Effects of different fertilizers over an 11 year cultivation period (1983-1993) and influence of soil liming applied in 1992 on maize yields. FO : manure ; FM : mineral fertilizer ; FMO : organomineral fertilizer (FO + FM).

Tableau 1

Effets du fumier, de l'engrais minéral et de la fumure organo-minérale sur l'acidité et l'aluminium échangeable du sol (horizon 0-15 cm) après neuf années (1983-1992) de culture continue de maïs

	Tém	FO	FM	FMO	Sol	ppds (5 %)
pH eau	4,3	5,6	4,7	5,3	5,5	-
pH KCl	4,0	4,5	3,6	3,8	4,3	0,3
H ⁺ (mEq/100 g)	0,06	0,02	0,17	0,13	0,08	0,06
Al ³⁺ (mEq/100 g)	0,19	0,05	0,48	0,34	0,15	0,11
AE (mEq/100 g)	0,25	0,07	0,65	0,46	0,23	0,14
m (%)	16,6	2,5	33,8	20,5	9,0	7,4

Tém = témoin non fertilisé ; FO = fumier seul (5 t/ha tous les 2 ans) ; FM = engrais minéral seul ; FMO = fumier + engrais minéral ; Sol = sol d'origine ; AE = acidité d'échange ; m = taux de saturation du complexe d'échange en aluminium ; ppds = plus petite différence significative (p < 5 %).

Effects of organic manure, mineral fertilizers and organomineral fertilizers on soil acidity and exchangeable aluminium (horizon 0-15 cm) after 9 years of maize cultivation (1983-1992)

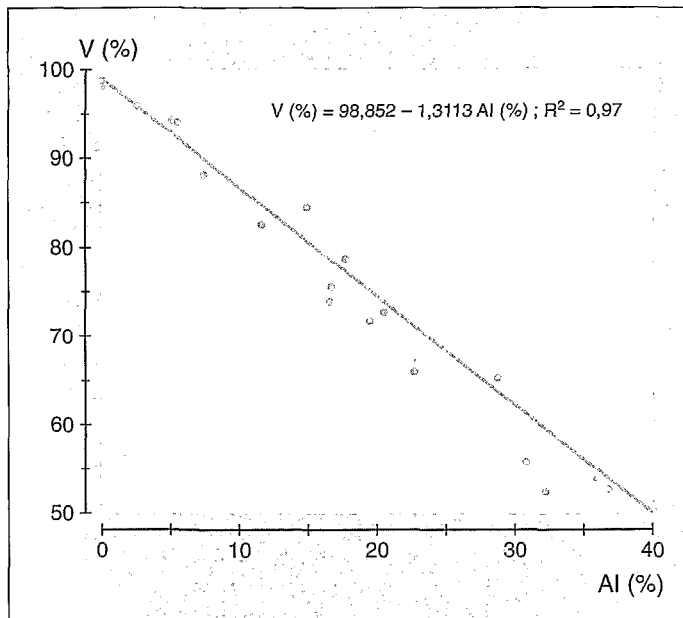


Figure 3. Relation entre la saturation en bases (V) et la saturation en aluminium échangeable du sol (Al) sous l'influence des fumures.

Figure 3. Effects of organic and mineral fertilizers on the relationship between base saturation and aluminum saturation in the soil.

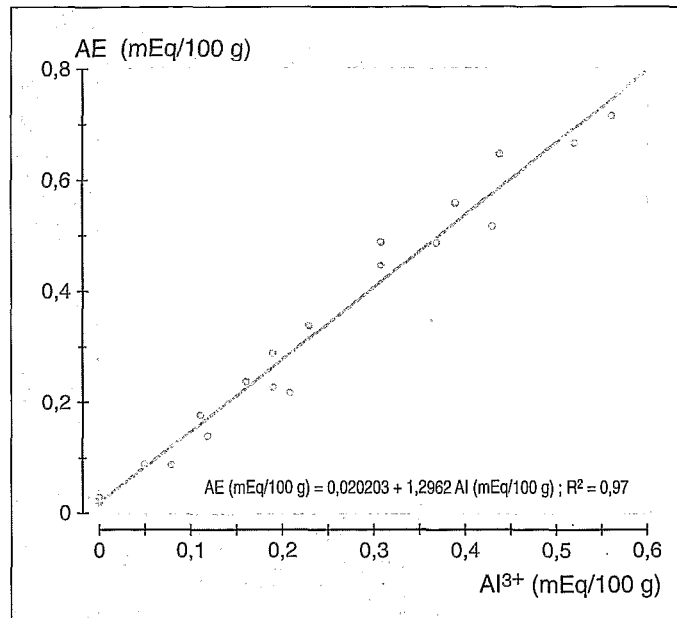


Figure 4. Relation entre l'acidité d'échange (AE) et l'aluminium échangeable du sol (Al³⁺).

Figure 4. Relationship between acidity exchange and exchange aluminum in the soil.

la FM est atténué lorsque l'engrais est associé au fumier (FMO).

On note, pour l'ensemble des traitements, une forte corrélation linéaire négative

($p < 0,01$) entre saturation en Al³⁺ et saturation en bases échangeables du sol (figure 3): l'aluminium échangeable est abondant pour les fumures qui ont entraî-

né une forte désaturation du complexe en bases et inversement. L'augmentation de Al³⁺ dans le complexe d'échange s'expliquerait à 97 % ($R^2 = 0,97$) par la diminution des bases échangeables. Il existe aussi une forte corrélation linéaire positive ($p < 0,01$) entre Al³⁺ échangeable et acidité d'échange (figure 4). Ainsi, 97 % ($R^2 = 0,97$) des variations de l'acidité d'échange seraient gouvernées par l'Al³⁺ échangeable. L'acidité d'échange et le pH-KCl sont liés par une équation de régression de type exponentiel (figure 5): 89 % ($R^2 = 0,89$) des variations de l'acidité d'échange peuvent être expliquées à partir des mesures de pH-KCl en utilisant l'équation de régression :

$$AE \text{ (mEq/100 g)} = 5\,307,8 + 10^{(-1,0738 \text{ pH-KCl})}$$

Effets des fumures sur l'azote, le carbone, les bases échangeables et la CEC du sol

En dehors de la FMO, tous les traitements entraînent une baisse significative de l'azote, comparativement au sol du départ; pour toutes les fumures, la mise en culture a entraîné une baisse du carbone organique du sol, avec une perte de 50 % pour la FM après neuf années de culture (tableau 2).

Tableau 2

Effets du fumier de l'engrais minéral et de la fumure organo-minérale sur la capacité d'échange cationique (CEC) effective et la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol après neuf années (1983-1992) de culture continue de maïs

	Tém	FO	FM	FMO	Sol	ppds (5 %)
	(horizon 0-15 cm)					
CEC (mEq/100 g)	1,22	1,76	1,41	1,65	1,71	ns
N (mg/kg)	172	207	222	272	285	46
C (%)	0,19	0,24	0,23	0,36	0,45	0,07
P (ppm)	6,7	6,6	23,9	24,9	4,4	3,0
K ⁺ (mEq/100 g)	0,25	0,45	0,29	0,41	0,44	0,06
Ca ²⁺ (mEq/100 g)	0,65	0,89	0,32	0,55	0,63	0,32
Mg ²⁺ (mEq/100 g)	0,20	0,33	0,11	0,21	0,41	0,15
Na ²⁺ (mEq/100 g)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01
S (mEq/100 g)	0,97	1,69	0,76	1,19	1,48	0,55
V (%)	78,0	96,3	53,8	72,0	86,1	10,3

Tém = témoin non fertilisé ; FO = fumier seul (5 t/ha tous les 2 ans) ; FM = engrais minéral seul ; FMO = fumier + engrais minéral ; S = somme totale des bases ; V = taux de saturation du complexe d'échange en bases échangeables ; Sol = sol d'origine.

Effects of organic manure, mineral fertilizers and organomineral fertilizers on soil effective cation exchange capacity (CEC) and nutrient availability after 9 years of maize cultivation (1983-1992)

Summary

Long-term effects of various fertilizers on maize yields in an oxisol in Burkina Faso

B.V. Bado, M.P. Sédogo, M.P. Cescas, F. Lompo, A. Bationo

Long-term effects of mineral fertilizers (FM), organic manure (FO) and organomineral fertilizer (FOM), i.e. a mixture of FM and FO, were compared on an oxisol over an 11 year period in fields cropped with maize (Zea mays). Fisher randomized blocks with 4 treatments and 6 replications were used. Maize yields were evaluated yearly. After 9 cropping years (1983-1992), the major soil chemical properties were measured by laboratory analysis.

All treatments increased maize yields during the first period of 3-4 years (Figure 2). In the second period of 4-6 years, maize yields decreased for all treatments. FOM gave higher yields than FM over the 11 year period; the latter decreased soil organic carbon and exchangeable bases (Table 2); 50% loss of soil organic carbon was observed after 9 years of cultivation under FM, as compared to 25% loss with FMO. FM also increased soil acidity and exchangeable aluminum (Table 1). The soil results with different treatments gave a negative correlation ($P < 0.01$) between soil base saturation and aluminum saturation (Figure 3). A significant positive correlation ($P < 0.01$) was observed between soil exchangeable acidity and exchangeable aluminum (Figure 4). Soil exchangeable acidity and pH-KCl were correlated with an exponential regression (Figure 5). When soil acidity and aluminum were neutralized by liming, maize yield increased (Figure 2), indicating that soil acidification by continuous cultivation may be an important factor limiting fertilizer efficiency.

Cahiers Agricultures 1997 ; 6 : 571-5.

la minéralisation, il y a risque d'une baisse rapide de la matière organique du sol ayant comme conséquence une diminution des bases échangeables, de la CEC et une acidification avec une augmentation de l'aluminium échangeable.

La baisse de matière organique est-elle responsable des réductions de rendements ? Le sol fertilisé par la FM perd la moitié de son carbone organique. Si la matière organique était le seul facteur responsable de la baisse de rendement, il suffirait d'accompagner l'engrais d'un amendement organique pour maintenir le stock de carbone organique et stabiliser les rendements. Or, la FMO ne maintient pas les rendements, probablement parce que le niveau de la matière organique du sol n'est pas le seul facteur impliqué. Après un défrichage, la matière organique du sol nouvellement mise en culture évolue vers un nouvel équilibre imposé par les nouvelles conditions du pédoclimat agricole [7-9]. Dans la zone écologique de cette étude, la baisse systématique du taux de matière organique après la mise en culture varie généralement de 25 à 50 % [1, 9-11]. Sur des sols analogues, la matière organique du sol ne devient un facteur limitant pour la réponse aux engrais que lorsque son niveau descend en dessous de 0,6 % [2]. La FMO, qui conserve au moins ce seuil, ne parvient toutefois pas à maintenir les rendements, probablement parce que l'acidité induite par l'engrais minéral provoque à long terme une désaturation en bases et une saturation en Al^{3+} (jusqu'à

Lorsque l'engrais minéral est combiné avec le fumier, le déficit en carbone est estimé à 25 % du stock du départ. Ces fortes variations de la teneur en carbone organique affectent peu la CEC effective du sol (tableau 1). La FM diminue le calcium et le magnésium échangeables, alors que la FMO diminue uniquement le magnésium échangeable du sol (tableau 1).

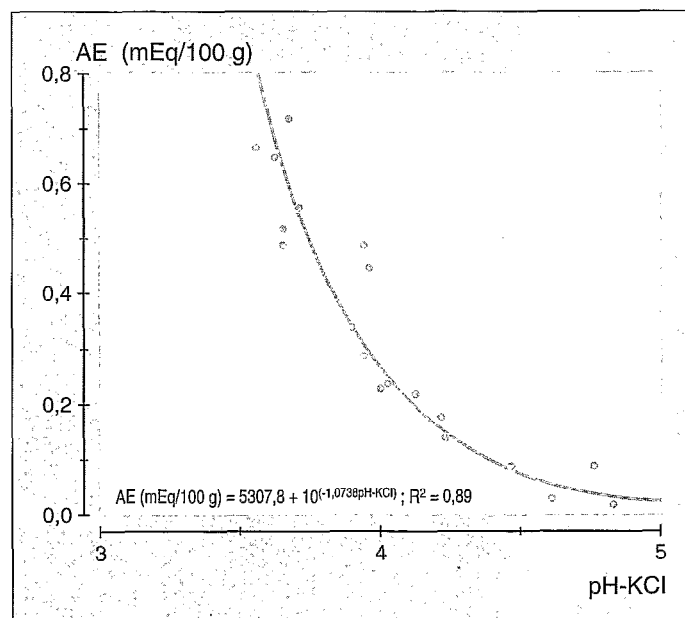
geable. La baisse de la teneur en carbone organique met en évidence la problématique de gestion de la matière organique dans les systèmes traditionnels qui exportent continuellement les résidus de récolte. Sans restitution des résidus ou d'autres amendements organiques pour compenser

Discussion

La mise en culture du maïs sans apport d'engrais entraîne une diminution du carbone organique et une désaturation du complexe en bases échangeables du sol qui s'expliqueraient par la minéralisation de la matière organique, l'absorption des cations par la culture et les pertes par lixiviation ayant pour conséquence une baisse de rendement. L'efficacité de l'engrais minéral sur les rendements est limitée à trois ou quatre ans. La fertilisation exclusivement minérale accentue la diminution du carbone organique et la désaturation du complexe en bases échangeables et, de plus, augmente l'acidité d'échange constituée essentiellement d'aluminium échan-

Figure 5. Relation entre l'acidité d'échange (AE) et le pH-KCl du sol.

Figure 5. Relationship between exchange acidity and pH-KCl in the soil.



34 % d'Al échangeable) toxique pour le maïs [11, 12, 13]. Pour d'autres chercheurs [14], on distingue clairement les effets de la toxicité aluminique à des seuils de 15 % alors que les rendements du maïs sont déjà affectés. L'absorption des cations par la culture et la lixiviation des nitrates emportant des cations basiques concourent à une désaturation accélérée du complexe d'échange. Les cations basiques seraient alors progressivement remplacés par l'aluminium et le processus serait accentué avec la FM parce que l'azote non utilisé augmente la lixiviation des bases. Malgré les apports de potassium par l'engrais minéral, le potassium disponible est inférieur à celui du sol de départ. Eu égard aux faibles rendements, il est peu probable que la culture ait absorbé de grandes quantités de potassium. Le potassium-engrais est probablement lixivié et l'effet positif du fumier proviendrait surtout du fait qu'il apporte certains cations basiques comme le potassium et le calcium, ce qui recharge le complexe d'échange du sol en bases. Il parvient ainsi à maintenir le niveau de potassium et de calcium mais n'empêche pas la baisse du magnésium échangeable du sol. De plus, le fumier pourrait complexer une partie de l'aluminium échangeable, limitant ainsi l'acidification. Le chaulage qui neutralise l'excès d'aluminium échangeable confirme le rôle de l'acidité induite par l'engrais minéral dans cette évolution des rendements.

Conclusion

Les résultats agronomiques et les modifications physico-chimiques indiquent que, sur ce type de sol, une plante exigeante comme le maïs demande un minimum de fertilisants. Les réserves minérales du sol étant très limitées, l'engrais minéral est nécessaire mais ne suffit pas, seul, pour une production à long terme, suite à la baisse rapide de la matière organique, à l'acidification et à l'augmentation de l'aluminium échan-

geable du sol, créant un risque de toxicité aluminique. Un complément de fumure organique sous forme de fumier permet de limiter ces conséquences défavorables liées à l'engrais minéral, sans cependant stabiliser les rendements, car il est incapable de neutraliser toute l'acidité induite par l'engrais minéral. En plus des amendements organiques, des chaulages périodiques sont donc nécessaires pour neutraliser l'acidité qui limite l'efficacité des engrais dans les conditions étudiées ■

Références

- Pichot J, Sédogo MP, Poulain JF. Évolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence des fumures minérales et organiques. *Agronomie Tropicale* 1981 ; 36 : 122-33.
- Berger M, Belem PC, Dakouo D, Hien V. Le maintien de la fertilité des sols dans l'Ouest du Burkina Faso et la nécessité de l'association agriculture-élevage. *Cot Fib Trop* 1987 ; 17 : 10.
- Kamprath EJ. Crops response to lime on soils in the Tropics. In : Adams F., éd. *Soil Acidity and liming*. Madison, Wisconsin USA : Second Edition 1984 : 349-67.
- Peech M. Exchange acidity. In : Black CA, ed. *Methods of soil analysis*. Madison : American Society of Agronomy 1965 : 891-9.
- Haby VA, Russelle MP, Skogley EO. Testing soil for potassium calcium and magnesium. In : Westerman RL, ed. *Soil testing and plant analysis*. Madison : Soil science society of America, 1990 : 181-227.
- Fixen PE, Grove JH. Testing soils for phosphorus. In : Westerman RL, ed. *Soil testing and plant analysis*. Madison : Soil science society of America, 1990 : 141-80.
- Tisdale SL, Werner NL, Beaton DJ. *Soil fertility and fertilisers*. New York : Macmillan Publisher Company, 1985 ; 732 p.
- Foth HD. *Fundamentals of soil science*. New York : John Wiley & sons, 1990 ; 336 p.
- Fauck R, Moureaux CI, Thomann C. Bilan de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après 15 années de culture continue. *Agron Trop* 1969 ; 24 : 263-301.
- Sédogo MP. *Contribution à l'étude de la valorisation des résidus culturaux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride. Matière organique du sol, nutrition azotée des cultures*. Thèse de doctorat (ingénieur). INPL Nancy, 1981 ; 135 p.
- Pieri C. *Fertilité des terres de savanes. Bilan de 30 années de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Paris : Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT, 1989 ; 444 p.
- Manrique LA. The relationship of soil pH to aluminum saturation and exchangeable aluminum in Ultisols and Oxisols. *Commun Soil Sc and Plant Anal* 1986 ; 17 : 439-55.
- Fox RH. Soil pH, aluminum saturation, and corn grain yield. *Soil Sc* 1978 ; 127 : 330-4.
- Pearson RW. *Soil acidity and liming in the humid tropics*. New York : Cornell international agriculture bulletin 30, 1975 ; 65 p.

Résumé

Les effets à long terme d'un engrais minéral (FM), du fumier (FO) et d'une fumure organo-minérale (FMO) associant engrais et fumier ont été comparés sur un sol ferrallitique du Burkina Faso, sous culture continue de maïs pendant onze années. Le dispositif d'étude au champ était celui des blocs de Fisher comportant quatre traitements en six répétitions. Après neuf années de culture (1983-1992), les principales propriétés physico-chimiques du sol ont été évaluées par des analyses de laboratoire.

Toutes les fumures augmentent les rendements durant trois à quatre années ; les rendements décroissent ensuite progressivement au cours des années suivantes. La FMO est toujours plus efficace que la FM, qui diminue le carbone organique et les bases échangeables du sol tout en augmentant l'acidité et l'aluminium échangeable (Al) au-delà du seuil toléré par le maïs. L'adjonction du fumier à la FM (FMO) permet de limiter la perte en matière organique du sol et de réduire son acidification. En neutralisant l'excès d'acidité par le chaulage, on observe une augmentation des rendements du maïs.