

Le phosphore biodisponible des sols : une des clés de l'agriculture durable en Afrique de l'Ouest

Emmanuel Compaoré, Jean-Claude Fardeau, Jean-Louis Morel,
Michel P. Sedogo

Parmi les vingt éléments indispensables à la vie, le phosphore est un élément dont seule la fraction biodisponible influence les prélèvements de P par les cultures et les rendements. Le P est, à l'échelle humaine, un élément non renouvelable, ce qui devrait imposer son recyclage le plus fréquemment possible. Les définitions de l'agriculture durable, qui est un des facteurs majeur du développement durable, sont diverses et liées aux groupes de pression qui les propagent. Mais elles possèdent en commun deux points centraux en termes de conséquence agronomiques. Il s'agit de :

- produire de la nourriture en quantité suffisante pour une population sans cesse croissante, ce qui, le plus souvent en Afrique de l'Ouest, impose d'accroître la production par unité de surface cultivée ;
- ne pas altérer le potentiel de production des systèmes agricoles afin d'être en mesure de satisfaire les besoins des générations futures [1, 2].

E. Compaoré : Inera, Station de recherches de Farako-Bâ, 01 BP910, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
<drh.hb@fasonet.bf>

J.-C. Fardeau : Département environnement et agronomie, Inra, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles, France.

J.-L. Morel : LSE, Ensaia, BP 172, 54505, Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France.

M.P. Sedogo : Centre national de la recherche scientifique et technologique, BP 7192, Ouagadougou, Burkina Faso.

Tirés à part : E. Compaoré

Thèmes : Agronomie ; Phytotechnie.

Ainsi, chaque fois que la biodisponibilité du P du sol limite les rendements indispensables à la satisfaction des besoins alimentaires, la pratique agricole utilisée doit être considérée comme non durable. Cette situation est celle de la majorité des agro-systèmes « dégradés » d'Afrique de l'Ouest [3-5] où il est indispensable d'accroître soit la réserve globale de P biodisponible des sols, soit sa biodisponibilité instantanée nécessaire à la nutrition des plantes, par une politique de fertilisation adaptée à chaque culture. La méthode la plus souvent préconisée est l'apport d'engrais phosphatés minéraux ou organiques. Des choix contrastés portent sur :

- les formes chimiques à utiliser : formes solubles dans l'eau et le citrate d'ammonium neutre ou formes insolubles dans ces réactifs conventionnels ;
- les doses à appliquer : annuelles, voisines des exportations dues aux récoltes, ou massive une première fois, considérée comme une « recapitalisation » unique, suivie de doses annuelles proches de celles des exportations par les récoltes [6, 7].

Notre travail a porté sur l'analyse de la fertilité phosphorique et de ses variations, sous l'effet d'apports d'engrais, sur des sols soudano-sahéliens d'Afrique de l'Ouest, en faisant appel à la seule méthode actuellement disponible susceptible de rendre compte de la biodisponibilité réelle du P : il s'agit de la méthode des cinétiques d'échanges isotopiques des ions phosphate pratiquée dans des mélanges sol-solution de sol. Les résultats collectés contribuent à affiner la politique et les pratiques de fertilisation P à raisonner dans ce type d'agrosystème.

Matériel et méthodes

Sols

Trente-six sols ont été prélevés dans la zone soudano-sahélienne au Burkina Faso. Il s'agit de sols ferrugineux tropicaux représentatifs de ceux rencontrés dans l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Leurs caractéristiques physico-chimiques moyennes sont regroupées dans le *tableau 1*.

Phosphore biodisponible des sols

Le phosphore biodisponible des sols doit être caractérisé par au moins trois facteurs [8] qui peuvent influencer les prélèvements de P par les plantes, donc les rendements. Il s'agit des facteurs :

- *intensité* qui doit expliciter le potentiel chimique des ions phosphate dans la solution de sol, lieu du prélèvement par les racines ;
- *quantité* qui doit expliciter la quantité de phosphore susceptible d'être prélevée ;
- *capacité* qui doit expliciter le pouvoir tampon du sol pour les ions phosphate, c'est-à-dire l'ampleur des variations du facteur intensité lorsque le facteur quantité varie sous l'effet du prélèvement par les plantes ou de la fertilisation.

L'explicitation de ces trois facteurs va requérir de déterminer au moins trois variables expérimentales caractéristiques du phosphore du sol.

En analyse de routine, la fraction biodisponible est quantifiée par des extractions

Tableau 1**Principales propriétés physico-chimiques des 36 sols analysés**

	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	pH	MO (%)	Amorphe CDB	
						Al (%)	Fe (%)
Moyenne	8,3	18,8	72,9	6,2	0,62	3,2	2,6
Minimum	5,0	13,7	60,4	5,2	0,4	1,8	0,2
Maximum	14,4	21,6	80,2	7,1	0,9	5,6	5,4
Écart type	2,6	3,0	4,8	0,5	0,14	1,0	0,3

Main physico-chemical properties of the 36 analysed soils

chimiques [3]. Ces extractions, qui diffèrent d'un pays à l'autre, libèrent du sol du P dont la disponibilité pour les plantes est supposée homogène et constante, indépendamment du niveau de prélèvement. La donnée analytique collectée ainsi est donc, au mieux, représentative du facteur quantité puisque les espèces chimiques du phosphore extraites ne sont que rarement celles prélevées par les plantes [4, 9]. L'interprétation des données analytiques issues des extractions repose, non sur des approches mécanistes, mais sur des corrélations établies entre des rendements, ou des rendements relatifs, et les quantités extraites, ce qui imposerait de n'utiliser ces corrélations que dans des situations proches de celle où elles ont été établies.

En analyse approfondie, la fraction biodisponible est caractérisée en utilisant la méthode des « cinétiques d'échanges isoniens des ions phosphate ». Elle permet d'obtenir, par la mise en œuvre d'un unique protocole, trois variables explicitant les facteurs intensité, quantité et capacité. Cette méthode consiste, schématiquement, à injecter des ions phosphate marqués au ^{32}P dans un mélange sol-solution de sol puis à déterminer la cinétique des transferts des ions marqués depuis la phase liquide où ils ont été injectés, jusqu'à la phase solide du sol [10]. Les flux, solution \rightarrow phase solide, d'ions marqués au ^{32}P se déroulent dans un mélange en équilibre dynamique, de sorte que ces flux aller rendent compte des flux opposés, phase solide \rightarrow solution, représentatifs des transferts indispensables aux prélèvements du P par les organismes vivants. L'équation décrivant, au cours du temps, ces transferts opposés comporte 3 paramètres qui dépendent de la fertilité en P

des sols et de leurs fertilisations récentes et anciennes [10]. Le couplage biologique/physico-chimie a permis de montrer que :

– seuls les ions phosphate isotopiquement échangeables sont assimilables par les plantes [11] ;

– l'ensemble des ions phosphate isotopiquement échangeables d'un sol est constitué de plusieurs compartiments (ou pools) structurés selon un schéma mamellaire [12] dans lequel les différents compartiments échangent leurs ions avec la solution du sol à des vitesses variables. Ils sont donc plus ou moins assimilables par les plantes. On peut distinguer le pool central du système mamellaire contenant les ions instantanément échangeables (pool E_1), les ions échangeables entre 1 minute et 1 jour (pool A), les ions échangeables entre 1 jour et 3 mois (pool B), les ions échangeables entre 3 mois et 1 an (pool C) et les ions échangeables en un temps supérieur à 1 an (pool D), les pools A, B, C et D étant tous branchés sur le pool E_1 .

La première variable explicative des prélèvements de phosphore par les racines est la concentration, C_p , des ions PO_4 dans la solution du sol. Elle est choisie comme facteur intensité. La quantité isotopiquement échangeable en 1 minute, E_1 , est retenue comme facteur quantité. Le facteur capacité est par définition le rapport E_1/C_p : il a pour valeur numérique le volume de solution qui peut être extrait du sol par les plantes, à la concentration C_p observée. La taille des différents compartiments d'ions phosphate, dont la mobilité est fonction du temps, est calculée à partir des paramètres de l'équation de transfert [10, 12]. Ainsi, cette méthode renseignant sur la cinétique de libération à long

terme des ions phosphate depuis les constituants solides des sols vers la solution du sol, mécanisme préalable et obligatoire pour l'entrée des ions vers les racines, procure une représentation dynamique du phosphore biodisponible.

Cette technique a été utilisée pour les 36 échantillons de terre prélevés au Burkina Faso ainsi que sur certains échantillons ayant reçu des engrais P.

Formes du phosphore appliqué aux sols

Les ions phosphate réagissant avec de nombreux constituants des sols, le raisonnement des formes d'engrais phosphatés à appliquer aux cultures est une des clés de la disponibilité ultérieure du phosphore dans les sols. Les apports de phosphore peuvent être minéraux ou organiques. C'est pourquoi trois formes de P ont été appliquées à une série de sols du Burkina Faso :

– une forme soluble dans l'eau, le triple superphosphate (TSP) ;

– un phosphate naturel local de Kodjari (PR_{Kod}) ;

– un compost ($\text{C}+\text{PR}_{\text{Kod}}$) obtenu par compostage d'un mélange de pailles de mil et de fumier de parc à bovin et de phosphate naturel de Kodjari. De tels compostages sont prônés depuis des décennies pour « solubiliser » les phosphates naturels. L'hypothèse implicite est que les protons, et des composés organiques capables de chélater des cations dont le calcium des phosphates naturels, apparaissant durant le compostage de déchets végétaux dissoudraient tout, ou partie, des phosphates naturels.

Le compost utilisé a été obtenu en respectant les pratiques fermières. Environ 100 kg de paille ont été mélangés à 70 kg de fumier de bovins. Puis 3 kg de phosphate naturel de Kodjari ont été mélangés à cet ensemble. Le tout mis en tas a été arrosé de temps à autre pendant trois mois. Dans ce compost fermier, la teneur du P total était de 0,37 % et celle du P organique de 690 mg par kg de matière sèche.

Mélanges sol-engrais

Les apports de P aux terres ont été de 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Les mélanges sol-engrais ont été incubés aux deux tiers de la capacité de rétention en eau durant un mois à la température de 25 °C.

Résultats et discussion

Statut phosphaté des sols d'Afrique de l'Ouest

Les quantités de phosphore total du sol (*tableau 2*) sont représentatives de ces types de sol [3].

Le phosphore biodisponible d'un sol n'est plus facteur limitant des rendements dès que la quantité E_1 est supérieure à 5 mgP.kg^{-1} . Dans les sols soudano-sahéliens du Burkina Faso, cette quantité $E_1 = 1,12 \text{ mgP.kg}^{-1}$ est en moyenne très inférieure à cette valeur limite (*tableau 2*). De même les concentrations moyennes, C_p , des ions phosphate dans la solution du sol, voisines de $0,07 \text{ mgP.l}^{-1}$, ne permettent pas une nutrition phosphatée adéquate des cultures, atteinte pour des valeurs supérieures à $0,2 \text{ mgP.l}^{-1}$, et ce d'autant plus que le pouvoir tampon moyen, $E_1/C_p = 16,2 \text{ L.kg}^{-1}$, de ces sols est, sauf exception, très limité.

La moyenne des quantités E_1 de 280 échantillons de sols prélevés dans la région normande (France) est de $17,7 \text{ mgP.kg}^{-1}$ alors qu'elle n'est que de $1,12 \text{ mgP.kg}^{-1}$ dans ces sols. Deux facteurs essentiels expliquent ces différences. Dans ces zones de l'Afrique de l'Ouest, d'une part, le fond pédogéochimique « phosphore » dans l'horizon de surface est très inférieur à celui des milieux tempérés, situation qui illustre que le phosphore migre plus en moyenne que le squelette du sol, et, d'autre part, la pratique du *soil mining*, à savoir la culture sans restitution de phosphore, contribue également à la présence d'un niveau de réserves de phosphore biodisponible ne permettant plus de satisfaire les besoins

des cultures [13], même lorsque ceux-ci ne sont que de l'ordre de $5 \text{ kgP.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. L'apport de fertilisants phosphatés devient alors impératif pour assurer la durabilité des agrosystèmes et le développement socio-économique des zones qui les entourent. Cette recommandation n'est pas nouvelle, mais il semble nécessaire de la rappeler.

Effets sur la fraction immédiatement biodisponible d'apports de phosphore sous forme de phosphates minéraux ou de compost additionné de phosphate naturel local

Les résultats d'apports de TSP, de PR_{Kod} et de $C+PR_{Kod}$, sur les valeurs des paramètres caractéristiques du phosphore biodisponible d'un sol ferrugineux tropical « moyen » représentatif des sols du Burkina Faso et plus généralement de la majorité des sols de l'Afrique de l'Ouest sont regroupés dans le *tableau 3*.

Effet du TSP. L'apport de TSP accroît significativement à la fois la concentration, C_p , des ions phosphate dans la solution du sol et la taille du compartiment E_1 , c'est-à-dire des ions phosphate directement et instantanément assimilables par les plantes. La majorité du P du TSP reste dans le pool E_1 (*tableau 3*), c'est-à-dire là où il a été introduit.

Ce résultat confirme directement que le pouvoir fixateur de ces sols pour les phosphates est très limité ; la conséquence « mécanique » est une concentration moyenne des ions phosphate de $2,7 \text{ mgP.l}^{-1}$ dans la solution du sol, bien supérieure à $0,2 \text{ mgP.l}^{-1}$ assurant une

nutrition non limitante des plantes. Tout drainage, inévitable durant la saison des pluies dans ces sols, entraînera un lessivage d'ions phosphate dans les horizons inférieurs où le pouvoir fixateur est toujours supérieur à celui des horizons de surface. Il est donc indispensable de ne pas appliquer dans les sols en place des doses aussi élevées que celles choisies dans nos expériences.

Dans les sols à pouvoir fixateur limité à très limité, on observe des relations quasi linéaires entre les quantités de phosphore apportées sous forme d'engrais phosphatés solubles dans l'eau, tel le TSP, et celles présentes d'une part en solution, C_p , et d'autre part dans E_1 [10, 13]. Des apports 10 fois plus faibles que ceux utilisés ici, c'est-à-dire de l'ordre de 5 mgP.kg^{-1} , permettent d'atteindre la valeur seuil de $0,2 \text{ mgP.l}^{-1}$ assurant une nutrition végétale optimale. En estimant le poids de terre à $3\,000 \text{ t.ha}^{-1}$, un apport de 5 mgP.kg^{-1} correspond à 15 kgP.ha^{-1} , une quantité souvent compatible avec les conditions économiques locales.

Effet du phosphate naturel de Kodjari. L'apport de phosphate local de Kodjari n'a pas modifié significativement l'ensemble des caractéristiques C_p , E_1 et C_p/E_1 , de la fraction la plus biodisponible (*tableau 3*). Deux facteurs expliquent ce résultat :

- le pH du sol est voisin de 6,0, c'est-à-dire un pH trop élevé pour permettre une dissolution partielle des phosphates naturels, même en sol où la teneur initiale est très faible ;

- le phosphate naturel de Kodjari n'est pas un phosphate naturel tendre [14].

Rôle du compost et du compostage. L'apport du compost additionné de phosphate naturel, comme l'apport du phosphate naturel seul, n'a pas modifié de manière significative les paramètres caractéristiques de la biodisponibilité du phosphore du sol. Ce résultat confirme d'autres données obtenues dans des conditions proches [15]. Ainsi, les composts de résidus de culture additionnés de phosphate naturel accroissent le phosphore total des sols sans accroître leur phosphore biodisponible [15]. Ces résultats montrent que l'ampleur des mécanismes escomptés, tels que la production de protons et/ou d'acides organiques chélatants, est trop peu importante pour assurer la transformation, en une forme biodisponible, du phosphate naturel de Kodjari, même appliqué en quantité faible par rapport à la masse de matière organique en compostage.

Tableau 2

Caractéristiques du phosphore des 36 sols burkinabès analysés

	Extractions chimiques			Données isotopiques		
	P total (mgP.kg^{-1})	P org. (mgP.kg^{-1})	P Bray 1 (mgP.kg^{-1})	C_p (mgP.l^{-1})	E_1 (mgP.kg^{-1})	E_1/C_p (l.kg^{-1})
Moyenne	180	33	5,2	0,069	1,12	16,2
Minimum	103	19	1,2	0,002	0,11	55,0
Maximum	444	58	44,2	1,2	16,10	13,4
Écart type	67	85	8,4	0,23	3,20	

Characteristics of phosphorus in the 36 burkinabè soils studied

Il est classique d'observer qu'un apport de compost accroît les rendements des cultures et en même temps les prélèvements des éléments nutritifs, dont le phosphore. L'utilisation de la méthode dite par différence (traitement avec apport de compost-témoin sans apport de compost) conduirait à un coefficient d'utilisation apparent du phosphore apporté par le compost non nul, c'est-à-dire à la possibilité qu'aurait le compost de libérer du phosphore. Mais nos données révèlent que l'apport de ce compost n'accroît en rien le phosphore disponible du sol (tableau 3). L'effet positif du compost sur les rendements ne peut donc pas résulter d'une dissolution des phosphates naturels qui lui ont été ajoutés dans la phase de compostage. Les suppléments de prélèvement de phosphore par des cultures, en présence de compost phosphaté, ont donc une autre origine. Les composts de résidus de culture sont des mélanges contenant des matières organiques plus ou moins humifiées et des éléments minéraux tels N, P et K. En cas de fourniture d'azote par minéralisation de la matière organique native du sol inférieure à la satisfaction des besoins des cultures, l'azote apporté par le compost favorisera un développement racinaire plus important que dans les parcelles ne recevant pas de compost. L'accroissement de l'exploration racinaire autorise alors un prélèvement supplémentaire du phosphore natif du sol et non de celui du phosphate naturel appliqué. L'utilisation des traceurs ^{32}P et ^{15}N « marquant » phosphore et azote disponibles du sol permettrait une vérification directe de ce point de vue.

Effets des différents apports sur les réserves plus lentement assimilables

L'analyse approfondie du devenir du TSP dans ce type de sol permet également d'évaluer l'intérêt de la pratique de fertilisation phosphatée de redressement longtemps recommandée pour accroître de manière significative la fertilité phosphatée durable des sols sous climats tropicaux. Une fertilité phosphatée durable se constituera chaque fois que, à la suite d'apports de phosphore significativement supérieurs aux exportations de récoltes de l'année, les compartiments A, B, C et D de mobilité décroissante se rempliront de conserve afin de compenser, plus tard, les prélèvements par les cultures. Les données du tableau 3 montrent que :

Tableau 3

Modification des paramètres caractéristiques du phosphore biodisponible d'un sol burkinabé avec des apports d'engrais à la dose de 50 mgP.kg⁻¹

Traitements	C _p (mgP.l ⁻¹)	E ₁ (mgP.kg ⁻¹)	E ₁ /C _p (l.kg ⁻¹)	A (mgP.kg ⁻¹)	B (mgP.kg ⁻¹)	C (mgP.kg ⁻¹)	D (mgP.kg ⁻¹)
Sol témoin	0,009	0,15	17,0	0,5	0,9	0,5	148
TSP	2,7	31,00	11,5	6,0	4,0	1,6	157
PR _{Kod}	0,022	0,30	14,0	0,7	1,2	0,6	197
Compost + PR _{Kod}	0,026	0,36	14,0	1,0	1,7	0,9	196

Characteristic parameters of bioavailable soil P as affected by P applications at 50 a rate of mgP.kg⁻¹

- le TSP se distribue prioritairement dans E₁, la forme directement assimilable, et dans D, la forme la moins assimilable, les mouvements d'ions à partir de ce pool ne pouvant être assurés dans l'année ;
- les phosphates naturels compostés ou non ne chargent que le pool D parce qu'ils ne sont pas dissous.

Ainsi, quelle que soit la spéciation de l'apport, les compartiments A, B et C, de mobilité intermédiaire, restent presque vides. Une telle distribution indique que dans ces sols :

- du phosphore apporté sous forme soluble dans l'eau est susceptible de devenir rapidement peu disponible sans passer par les stades intermédiaires A, B et C ;
- à l'opposé des constats faits dans les sols présents sous climats tempérés, la mise en place de réserves à mobilité capable de satisfaire, dans la journée (pool A), la demande des plantes ne semble pas réalisable ni par des formes solubles dans l'eau ni par des formes de type phosphates naturels insolubles dans l'eau. La recapitalisation phosphatée durable des sols, encore recommandée

Summary

Bioavailable soil phosphorus as a key to sustainable agriculture in Western Africa

E. Compaoré, J.-C. Fardeau, J.-L. Morel, *et al.*

In Western Africa, due to continuous soil mining, lack of P is very often a limiting factor in crop production. Under such conditions, sustainable development cannot be assured. Effects of P fertilizer applications on the analytical characteristics of bioavailable soil P were analysed using the isotopic exchange kinetic method applied to phosphate ions. The P fertilizers applied were: triple superphosphate (TSP), a local phosphate rock from Kodjari (PR_{Kod}), and organic residues composted with the same phosphate rock (C+PR_{Kod}). In most Burkina Faso soils, as in most of the soils of Western Africa, the lack of bioavailable soil P can be a limiting factor in crop production (table 2), even at a low P crop requirement. In this soil type: (i) the buffer power for phosphate ions is low; (ii) available soil P is not significantly modified by PR_{Kod} or C+PR_{Kod} applications and the available soil P thus remains a limiting factor in crop production (table 3); (iii) TSP applications significantly increase immediate soil P bioavailability but applications of PR_{Kod} do not, due to a soil pH of from 5.8 to 6.0; (iv) building up reserves of residual P capable of feeding, with time, the available soil P pool seems impossible. These observations lead us to: (i) advise against an available soil P recapitalization policy; (ii) recommend a P fertilization policy similar to that used for inorganic nitrogen.

Cahiers Agricultures 2001 ; 10 : 81-5.

par de grands organismes internationaux [3, 5, 7, 8], n'est pas justifiée dans ce type de sol. C'est dans la nature et les propriétés des constituants des sols capables de retenir de façon réversible les ions phosphate qu'il faut chercher l'origine de cette situation.

Conclusion

Les sols ferrugineux tropicaux de l'Afrique de l'Ouest ont été longtemps soumis à une utilisation agricole de type minier, le P y ayant été prélevé sans restitution. Les bilans actuels continuent d'être négatifs, voisins de $-3\text{kgP}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ poursuivant l'épuisement de la fraction assimilable. Le niveau de P biodisponible dans de très nombreux sols sous climat soudano-sahélien est l'un des premiers facteurs limitant la production agricole [6]. Une pratique d'agriculture durable soudano-sahélienne requiert l'application raisonnée d'engrais phosphatés en faisant appel à toutes les sources disponibles (phosphates locaux, phosphates importés, résidus de culture, résidus urbains).

Les résultats discutés dans ce document indiquent une probable impossibilité à constituer des réserves de P à mobilité moyenne susceptibles de réalimenter rapidement le pool directement assimilable par les cultures. La conséquence directe en est une impossibilité de réussir une fumure de redressement utilisable sur le moyen-long terme. Des politiques de recapitalisation, en particulier avec des phosphates naturels locaux, sont donc très hypothétiques. En revanche, une fertilisation phosphatée annuelle, appliquée comme l'azote sous une forme soluble dans l'eau et/ou dans le citrate d'ammonium neutre et avec des apports de P voisins des exportations des cultures pour éviter tout risque de lessivage de l'excédent durant la saison des pluies, sera efficace chaque fois que le phosphore est le premier facteur limitant. Cette démarche fondée sur la rationalité scientifique ne peut faire oublier les problèmes économiques locaux. Le Burkina n'est pas producteur d'engrais phosphatés solubles dans l'eau tels qu'ils se trouvent sur les marchés européens. Le coût des engrais importés dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest est tel qu'il ne peut pas être accessible à tous les agriculteurs. C'est pourquoi des productions locales d'engrais phosphatés partiellement solubilisés (PAPR), c'est-à-dire transformés par acidification partielle en forme soluble

dans l'eau, et de qualité intermédiaire, entre les phosphates très purs solubles dans eau et/ou citrate d'ammonium neutre en totalité et les phosphates naturels, devraient être un choix à étudier. Il y a 70 ans, l'Europe consommait de tels engrais ■

Références

1. Rodale R. Breaking new ground : the search for sustainable agriculture. *The futurist* 1983 ; 17 : 15-20.
2. National Research Council (NRC). *Towards sustainability : soil and water research priorities for developing countries*. Washington D.C. : National Academy Press, 1991 ; 125 p.
3. Roche P. Les méthodes d'appréciation du statut phosphorique des sols. Leur application à l'estimation des besoins en engrais phosphatés. In : *IMPHOS Proceedings of the 3rd International Congress on Phosphorus Compounds*. Casablanca (Morocco), 1983 : 165-93.
4. Fardeau JC, Frossard E. Processus de transformation du P dans les sols de l'Afrique de l'Ouest semi-arides : application au P assimilable. In : Tiessen H, Frossard E, eds. *Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems Regional workshop 4 : Africa SCOPE/UNEP*. March 18-22. Nairobi, Kenya (Africa), 1991 : 108-28.
5. Pieri C. Bilan du phosphore et agriculture durable en Afrique. In : Tiessen H, Frossard E, eds. *Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems Regional workshop 4 : Africa SCOPE/UNEP*. March 18-22. Nairobi, Kenya (Africa), 1991 : 44-72.
6. Anonyme. Conclusions relatives aux théories scientifiques de la fertilisation des sols. In : *Le*

colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive (Madagascar). 19-25 novembre 1967. Paris : IRAT, 1968 : 48-9.

7. Sanchez PA. Soil fertility replenishment in Africa : an investment in natural resource capital. In : *Proceedings of the world congress of soil science*. Montpellier. Symposium 12. Summaries. 1998 : Tome I, 218.
8. White RE, Beckett PHT. Studies on phosphate potential of soils. Part 1 : the measurement of phosphate potential. *Plant Soil* 1964 ; 20 : 1-16.
9. Morel C, Fardeau JC. Le phosphore assimilable des sols intertropicaux : ses relations avec le phosphore extrait par deux méthodes chimiques. *Agron Trop* 1987 ; 42 : 248-57.
10. Fardeau JC, Morel C, Boniface R. Cinétiques de transfert des ions phosphate du sol vers la solution du sol : paramètres caractéristiques. *Agronomie* 1991 ; 11 : 787-97.
11. Morel C, Plenchette C. Is the isotopically exchangeable phosphate of a loamy soil the plant available P ? *Plant Soil* 1994 ; 158 : 287-97.
12. Fardeau JC. Le phosphore assimilable des sols : sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *Agronomie* 1993 ; 13 : 317-31.
13. Compaoré E. *Contribution à la caractérisation et à la gestion de la fertilité phosphatée de quelques sols ferrugineux tropicaux*. Institut national polytechnique de Lorraine : Thèse de doctorat, 1996 ; 144 p.
14. Truong B. *Évaluation de l'efficacité agronomique de phosphates naturels provenant d'Afrique de l'Ouest*. Institut national polytechnique de Lorraine : Thèse de doctorat, 1989 ; 160 p.
15. Lompo F. *Contribution à la valorisation des phosphates naturels du Burkina Faso : étude des effets de l'interaction phosphates naturels - matières organiques*. Université nationale de Côte d'Ivoire : Thèse de docteur-ingénieur, 1993 ; 247 p.

Résumé

Les réserves de P biodisponible des sols ferrugineux du Burkina Faso, représentatifs de très nombreux sols d'Afrique de l'Ouest, peuvent fréquemment être facteur limitant des rendements. Les effets d'apports de phosphore sur les caractéristiques du phosphore biodisponible des sols ont été analysés en utilisant la méthode des cinétiques d'échanges isotopiques. Les engrais appliqués ont été : le superphosphate triple (TSP), un phosphate naturel exploité localement à Kodjari (PR_{Kod}) et un mélange organique composté en présence de ce même phosphate naturel ($\text{C}+\text{PR}_{\text{Kod}}$). Dans ces sols : le pouvoir tampon et le pouvoir fixateur sont très restreints ; les réserves biodisponibles, très inférieures aux teneurs connues pour être facteur limitant, ne sont pas significativement modifiées par des apports de phosphate naturel de Kodjari seul ou additionné à des résidus organiques durant leur compostage ; seul le TSP accroît significativement la biodisponibilité du phosphore du sol ; ni le TSP ni le phosphate naturel, appliqués en fumure de redressement, ne permettent de créer dans la phase solide du sol une réserve de phosphore biodisponible capable de ré-alimenter sur le moyen et long terme le pool de phosphate immédiatement disponible. Ces résultats conduisent, pour ce type de sol, à déconseiller toute pratique de fertilisation phosphatée de redressement et à conseiller une pratique de fertilisation phosphatée calquée sur celle recommandée pour l'azote.