

Modifications et stabilité du phosphore échangeable d'un ferralsol ingéré par un ver géophage

Lydie Chapuis et Michel Brossard

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 320, série II a,
p. 587 à 592,
1995

Résumé L'un des paramètres des cinétiques de dilution isotopique du phosphore est modifié par l'ingestion, du ferralsol étudié, par le ver géophage *Pontoscolex corethrus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta). La concentration d'ions phosphate de la solution du sol et le compartiment d'ions immédiatement échangeables associé au sol sont nettement augmentés. Divers mécanismes pouvant expliquer ces modifications sont discutés. La minéralisation du phosphore organique s'effectue au profit des formes les plus rapidement échangeables.

Mots-clés : Ferralsol, *Pontoscolex corethrus*, Phosphore échangeable, Turricules, Dilution isotopique, Microflore, ³²P.

L. C. : Laboratoire d'Écologie des Sols
Tropicaux, ORSTOM,
72, route d'Aulnay,
93143 Bondy Cedex, France ;

M. B. : ORSTOM, c/o CPB-CNRS,
BP n° 5,
54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex,
France.

Abstract Phosphorus transformations and stability in a ferralsol ingested by a geophagous earthworm

On ingesting a tropical ferralsol, the geophagous earthworm *Pontoscolex corethrus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta) changed a parameter of the phosphorus isotopic dilution kinetics. The phosphate concentration of the soil solution and the pool of the immediately exchangeable ions associated with the soil increased. Processes that could explain these modifications are discussed. The mineralization of organic phosphorus benefits the more rapidly exchangeable forms.

Keywords: Ferralsol, *Pontoscolex corethrus*, Exchangeable Phosphorus, Casts, Isotopic dilution, Microflora, ³²P.

Abridged English Version

EXCHANGEABLE phosphorus forms were measured in recently deposited and aged casts of *Pontoscolex corethrus*, a geophagous earthworm, fed with a ferralsol from a Peruvian tropical secondary forest. The control soil (SI) (table I), the non-ingested soil (NI) (but in contact with earthworms in the culture boxes) and the fresh casts, 12 hrs. maximum, (Tur) were studied. The exchangeable P were determined from isotopic dilution theory (Fardeau and Jappé, 1976) in the casts at 24, 48, 96, 192 and 360 hrs. Ageing experiments were carried out in two ways: (i) conditions of a cast kept humid inside the soil and (ii) conditions of a cast drying on the soil surface. The isotopic exchange kinetics method allowed the modelling of the exchangeable phosphorus pools (Fardeau, 1993). C_p (mg.l^{-1}) was the solution phosphate concentration deter-

mined colorimetrically (John, 1970). The amounts of exchangeable P after t minutes of isotopic exchange (E_{Piet} , expressed in mg P.kg^{-1} sol) were calculated: after 1 min. of exchange (E_1), between 1 min. and 24 hrs. ($E_{1 \text{ min.}-24 \text{ hrs.}}$), 24 hrs. and 3 months ($E_{24 \text{ hrs.}-3 \text{ m.}}$), 3 months and 1 year ($E_{3 \text{ m.}-1 \text{ y.}}$), and beyond 1 year ($E_{>1 \text{ y.}}$).

Total amounts of iron, aluminium and calcium were determined in water solutions by atomic absorption spectrometry.

RESULTS AND DISCUSSION

Exchangeable P modifications

With regard to r_p/R and n values, the control (soil) presents a low P-sorption capacity (table II). After ingestion, the physicochemical and microbial characteristics of the control are significantly modified (Barois and

09 OCT. 1995

ORSTOM. Fonds Documentaire

N° 42492 EK1

Cote B

Note

présentée par
Georges Pédré

remise le 28 novembre 1994,
acceptée après révision
le 23 janvier 1995.

Lavelle, 1986). A significant increase (four times more) between the control and the casts of the P_L free phosphate pool (C_p and E_i) is observed (table II). The amounts of rapidly exchangeable phosphate forms (until 3 months) are significantly influenced by the passage through the intestinal tract. A few hypotheses can explain these changes in the soil phosphate:

(i) The water extractable aluminium, iron and phosphate contents were increased (tables II and IV) by:

- dissolution of somewhat amorphous oxides;
- modification of the sorption complex, followed by aluminium, iron and phosphate desorption;
- depolymerization of organic complex.

(ii) *Pontoscolex corethrurus* adds water and intestinal mucus to ingested soil and then creates favourable physical and energetic conditions. The ingested soil microflora is then able to further digest the soil organic matter to the benefit of the earthworm (priming effect). This process involves the appearance of organic forms which can compete for orthophosphate sorbing sites. As a result, the amounts of water extractable phosphate may

be increased. From SI to Tur samples, the amounts of organic phosphorus decrease. The increases in C_p , E_i , $E_{i \text{ min-24 hrs.}}$ and $E_{24 \text{ hrs-3 m}}$ values are similar to the increase of the inorganic P content between SI and Tur samples. Therefore, on the basis of these results, the mineralization of organic phosphorus benefits the more rapidly exchangeable P forms.

Exchangeable P stability

Under incubation conditions, the water extractable phosphate and the rapidly exchangeable P tend with time towards the control values. Under air drying conditions, after 96 hrs., the water content of the casts does not allow the microflora activity and then the phosphate concentration in the solution is very low. As a result, the addition of water (isotopic exchange measure) creates conditions for the desorption of more easily extractable P . The partial lysis of microbial cells can provide phosphate to the free phosphate pool. The amounts of more rapidly exchangeable P pools remain, under air drying conditions, above the control ones.

Changes due to earthworm intervention lead to an increase of the P_L content of a soil with a low phosphorus reserve.

INTRODUCTION

Dans le sol, les quantités de phosphore assimilable par la plante peuvent localement être modifiées par l'activité de la faune. Les informations les plus complètes, et originales, relatives à l'effet de la faune sur le statut phosphaté du sol, sont obtenues en utilisant la méthode des cinétiques d'échange isotopique des ions phosphate dans des systèmes sol-solution en équilibre dynamique (Sharpley et Syers, 1976 ; López-Hernández *et al.*, 1989 ; Fardeau et Frossard, 1991 ; López-Hernández *et al.*, 1993).

Notre étude porte sur un ferralsol où *Pontoscolex corethrurus* est un ver géophage naturellement présent. Dans le cadre d'un élevage en laboratoire, les modifications du phosphore échangeable du sol induites par ce ver sont étudiées par la méthode de cinétiques d'échange isotopique. Cette étude permet de

pallier les problèmes liés à l'hétérogénéité des traits pédologiques rencontrés dans les expérimentations de terrain et à l'âge variable des déjections récoltées. La stabilité du phosphore échangeable des déjections de vers est évaluée au cours du temps. Cette expérience de vieillissement vise à étudier le devenir du phosphore dans des conditions qui simulent, soit un échantillon frais (ou restant humide à l'intérieur du sol), soit un échantillon séchant à la surface du sol. L'utilisation de l'outil isotopique permet une modélisation des différents compartiments de phosphore échangeable (Fardeau, 1993).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le sol et les vers sont prélevés dans une parcelle de forêt secondaire des Andes péruviennes (Yurimaguas). L'élevage en laboratoire est conduit sur un échantillon 0-10 cm de

sol (tableau I). *Pontoscolex corethrurus*, ver endogé poly-mésomique (Lavelle, 1981), appartient à la famille des Glossocolecidae (Oligochaeta). Les conditions d'incubation (28°C, 31 g eau.100 g⁻¹ sol) sont maintenues constantes lors de l'élevage. Les analyses portent sur le sol initial (SI), le sol non ingéré (NI) mais ayant été en contact avec les vers dans les boîtes d'élevage et les turricules de surface de moins de 12 h (Tur).

La stabilité du phosphore échangeable est étudiée sur les déjections ayant vieilli en conditions d'incubation ou en séchage à l'air durant 24, 48, 96, 192 et 360 h. Du fait de la petite taille des échantillons obtenus, des mesures répétitives ont été effectuées uniquement sur les lots de déjections laissées 360 h en incubation et 192 h en séchage.

Les quantités de phosphore échangeable sont déterminées selon la théorie de dilution isotopique (Fardeau et Jappé, 1976). R est la radioactivité initialement introduite, r_1 la radioactivité restant après 1 mn d'échange isotopique et n un paramètre obtenu expérimentalement. C_p (mg.l⁻¹), mesurée par colorimétrie (John, 1970) après filtration à 0,05 µm, est la concentration de phosphate dans la solution (rapport sol/eau 1/10). Les comptages de radioactivité sont effectués en scintillation liquide.

E_{Piet} est le phosphore isotopiquement échangeable en t minutes (mg P.kg⁻¹ sol) (Fardeau et Jappé, 1976). La modélisation des résultats selon la théorie de dilution isotopique (Fardeau, 1993) permet la caractérisation des quantités de phosphore isotopiquement échangeable (E_{Piet} mg P.kg⁻¹ sol) à 1 mn (E_1), entre 1 mn et 24 h ($E_{1\text{ mn}-24\text{ h}}$), entre 24 h et 3 mois ($E_{24\text{ h}-3\text{ mois}}$), entre 3 mois et 1 an ($E_{3\text{ mois}-1\text{ an}}$), et au-delà d'un an ($E_{>1\text{ an}}$).

Les quantités de fer, aluminium et calcium présents dans les extraits aqueux sont dosées par spectrométrie d'absorption atomique.

RÉSULTATS

Variabilité des résultats

Les paramètres expérimentaux des cinétiques de dilution isotopique et les quantités de phosphore échangeable (E_{Piet}) des

Tableau I Caractéristiques physiques et chimiques de l'échantillon moyen de l'horizon 0-10 cm du sol étudié.

Some characteristics of the upper layer (0-10 cm) secondary forest surface soil studied.

Sables (%)	67,70
Limons	23,00
Argiles	9,10
pH eau	4,38
pH KCl	3,55
C (%)	2,08
C/N	13,90
P organique (mg P.kg ⁻¹ sol)	155,63
P Inorganique	35,11
P total	190,74

échantillons SI, NI et Tur (tableau II) présentent une variabilité acceptable. Pour l'étude de la stabilité du phosphore échangeable, les répétitions effectuées présentent de faibles variations (tableau III). Du fait de la fiabilité de la méthode, ces variations seront considérées comme constantes au cours du temps.

Sol initial, sol non ingéré et turricules frais

Au regard des valeurs de r_1/R et de n , ce sol présente une capacité de rétention des ions phosphate faible ; la présence des vers n'affecte pas ces deux paramètres. Dans les turricules frais, les valeurs de C_p (mg.l⁻¹) et E_1 (mg P.kg⁻¹ sol) sont respectivement de 4 et 5 fois supérieures à celles du sol initial. Les compartiments $E_{1\text{ mn}-24\text{ h}}$ et $E_{24\text{ h}-3\text{ mois}}$ (mg P.kg⁻¹ sol) sont également sensiblement augmentés à la suite de à l'ingestion du sol par *Pontoscolex corethrurus* (tableau II). $E_{3\text{ mois}-1\text{ an}}$ et $E_{>1\text{ an}}$ restent inchangés.

Stabilité du phosphore échangeable

En incubation

Le rapport r_1/R est stationnaire au cours du temps (tableaux II et III). Les valeurs de C_p (mg.l⁻¹), E_1 , $E_{1\text{ mn}-24\text{ h}}$ et $E_{24\text{ h}-3\text{ mois}}$ (mg P.kg⁻¹ sol) diminuent de 24 à 360 h et tendent vers des valeurs proches de celles du sol initial (tableau II). $E_{3\text{ mois}-1\text{ an}}$ est constant. La quantité $E_{>1\text{ an}}$ fluctue tout en restant

Tableau II Paramètres de dilution isotopique et quantités de phosphore échangeable des échantillons moyens de sol initial (SI), sol non ingéré (NI) et turricules frais (Tur) ; les valeurs des différents pools E sont exprimées en mg P.kg⁻¹ sol.Isotopic exchange kinetics parameters and exchangeable phosphorus of: control (SI), non-ingested soil (NI) and fresh casts (Tur); E values are expressed in mg P.kg⁻¹ soil.

	SI	NI	Tur
r_1/R	0,83 a (0,05)	0,70 a (0,09)	0,75 a (0,08)
n	0,37 a (0,01)	0,33 a (0,02)	0,38 a (0,06)
C_p (mg.l ⁻¹)	0,04 a (0,01)	0,06 a (0,01)	0,19 b (0,04)
E_1	0,64 a (0,06)	0,88 a (0,16)	2,95 b (0,56)
$E_{1 \text{ mn-24 h}}$	5,81 a (0,54)	6,69 a (1,62)	21,47 b (7,37)
$E_{24 \text{ h-3 mois}}$	12,70 a (0,57)	15,20 a (2,92)	22,38 b (1,56)
$E_{3 \text{ mois-1 an}}$	4,33 a (0,08)	6,33 a (0,49)	4,71 a (1,63)
$E_{>1 \text{ an}}$	11,62 a (1,07)	27,49 b (5,14)	9,82 a (4,91)
P organique (mg P.kg ⁻¹ sol)	155,63	137,14	131,6

Pour deux lettres identiques dans une même ligne, aucune différence statistique n'est constatée ($p < 0,05$). écart-types entre parenthèses.

supérieure à celle de SI et Tur (tableaux II et III).

En séchage à l'air

La teneur en eau initialement de 30,2 g.100 g⁻¹ sol en moyenne dans des turricules frais passe à 12,1 dans les déjections de 24 h. Elle n'est que de 2,1 g.100 g⁻¹ sol dans les turricules de 192 h. Au cours du temps, r_1/R est relativement constant, C_p (mg.l⁻¹) diminue puis se stabilise. E_1 (mg P.kg⁻¹ sol) varie peu au cours du séchage. Les quantités $E_{1 \text{ mn-24 h}}$ et $E_{24 \text{ h-3 mois}}$ (mg P.kg⁻¹ sol) présentent deux phases d'évolution, diminution jusqu'à 96 h, puis augmentation pour atteindre finalement une valeur semblable à celle de l'échantillon Tur. $E_{3 \text{ mois-1 an}}$ diminue légèrement après 96 h, de séchage à l'air et $E_{>1 \text{ an}}$ subit une évolution en deux temps inverse à celle de $E_{1 \text{ mn-24 h}}$ et $E_{24 \text{ h-3 mois}}$.

Teneur en fer, aluminium et calcium

Elles sont nettement influencées par la présence du ver (NI) et par le passage au travers du tractus intestinal (Tur) (tableau IV).

DISCUSSION

Modifications du phosphore échangeable

Après ingestion, les caractéristiques physico-chimiques et microbiennes du sol sont

modifiées (Barois et Lavelle, 1986). Le compartiment P_L de phosphates libres (C_p et E_1) et les quantités des formes de phosphore les plus rapidement échangeables, jusqu'à 3 mois (tableau II) sont augmentés.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces modifications du statut phosphaté du sol :

1) Les vers, en ingérant le sol, augmentent les quantités d'aluminium, de fer et de phosphate présents dans les extraits eau (tableaux II et IV). Ceci peut être causé par :

- la dissolution partielle de fer et d'aluminium amorphes ;

- la désorption d'aluminium, de fer et de phosphate liés au complexe d'échange ;

- une dépolymérisation de complexes organiques liant fer, aluminium et matière organique.

2) Le ver ajoute de l'eau et du mucus intestinal au sol ingéré et crée ainsi les conditions physiques et énergétiques favorables à l'activité des micro-organismes (Lavelle *et al.*, 1983). Ce mucus (Martin *et al.*, 1987) est métabolisé dans l'intestin antérieur par la microflore du sol ingéré qui, ainsi activée, est à même de digérer la matière organique du sol au profit du ver (« priming effect »). Ce processus entraîne l'apparition de formes organiques susceptibles d'entrer en compétition avec les ions PO_4^{3-} pour les sites d'échange, augmentant ainsi la quantité de phosphate présents en solu-

Tableau III Évolution au cours du temps des paramètres de dilution isotopique et des quantités de phosphore échangeable d'échantillons de turrículos restés en incubation ou mis à sécher à l'air. Les quantités E sont exprimées en mg P.kg^{-1} sol. Écart-type entre parenthèses.

Time-course of isotopic exchange kinetics parameters and exchangeable phosphorus of casts aged incubation or in air. E values are expressed in mg P.kg^{-1} soil. Standard deviation in parentheses.

	24 h	48 h	96 h	192 h	360 h
<i>Viellissement en incubation</i>					
Teneur en eau (%) ...	29,00	28,60	28,00	26,10	18,60
r/R	0,54	0,55	0,57	0,62	0,69 (0,06)
n	0,32	0,27	0,30	0,33	0,30 (0,04)
C_p (mg.l^{-1})	0,13	0,13	0,10	0,08	0,07 (0,02)
E_1	2,44	2,47	1,87	1,45	1,15 (0,41)
$E_{1 \text{ mn-24 h}}$	14,67	10,82	10,64	10,45	6,98 (4,07)
$E_{24 \text{ h-3 mois}}$	20,92	16,30	17,97	19,69	14,62 (4,97)
$E_{3 \text{ mois-1 an}}$	6,05	5,76	6,35	6,91	6,26 (0,65)
$E_{>1 \text{ an}}$	17,25	25,97	24,50	22,83	32,32 (9,16)
<i>Viellissement en séchage à l'air</i>					
Teneur en eau (%)	12,10	6,00	4,00	2,1	
r_1/R	0,48	0,45	0,32	0,42	(0,07)
n	0,40	0,34	0,25	0,45	(0,05)
C_p (mg.l^{-1})	0,10	0,12	0,10	0,10	(0,01)
E_1	2,27	2,75	3,18	2,50	(0,71)
$E_{1 \text{ mn-24 h}}$	21,56	18,00	11,58	28,22	(2,78)
$E_{24 \text{ h-3 mois}}$	24,83	22,33	15,53	23,47	(1,21)
$E_{3 \text{ mois-1 an}}$	4,73	5,47	5,32	3,11	(0,58)
$E_{>1 \text{ an}}$	7,93	12,78	25,70	4,01	(1,56)

tion. Il facilite également la mise en solution de phosphate par minéralisation. De SI à Tur, la teneur de phosphore organique diminue et celle de phosphore inorganique augmente d'une quantité équivalente (tableau II). Le phosphore minéralisé se redistribue dans les compartiments des ions libres (C_p et E_1) et échangeables en moins de 3 mois ($E_{1 \text{ mn-24 h}} + E_{24 \text{ h-3 mois}}$).

Stabilité du phosphore échangeable

En incubation, la teneur en eau est maintenue constante ; les quantités de phosphate en solution et de phosphore isotopiquement échangeable en moins de 3 mois rejoignent, après augmentation, les valeurs relevées dans le sol initial. Lors du séchage à l'air, la teneur en eau des turrículos diminue rapidement avec le temps et, en dessous d'une certaine teneur, toute évolution semble bloquée ($4,0 \text{ g.100 g}^{-1}$ à 96 h) ; la microflore du sol

n'est plus à même de maintenir son activité. La concentration de phosphate en solution est alors suffisamment faible pour provoquer une désorption du P facilement échangeable lors d'un ajout d'eau (mesure d'échange isotopique). La lyse partielle des corps microbiens peut également fournir des phosphates au compartiment d'ions phosphate libres. Les valeurs des compartiments de phosphore échangeable en moins de 3 mois restent donc, en conditions de séchage à l'air, supérieures à celles du sol initial.

CONCLUSION

Les changements apportés par le ver à la dynamique du phosphore permettent de multiplier par quatre les quantités de phosphore présentes dans le pool d'ions phosphate libres de ce sol à faible réserve de phosphore total. Les effets résiduels des vers sur le phosphore échangeable du sol sont

Tableau IV Concentration de fer, aluminium et calcium (éléments totaux) en mg.l⁻¹ et valeurs de pH des extraits aqueux des échantillons moyens de sol initial (SI), sol non ingéré (NI) et turricules frais (Tur). Écart-types entre parenthèses.

	Ca	Fe	Al	pH
SI	0,88 (0,03)	0,97 (0,26)	2,23 (0,81)	4,38 (0,07)
NI	0,49 (0,13)	2,10 (0,57)	3,94 (1,21)	4,78 (0,07)
Tur	0,57 (0,15)	4,30 (0,31)	7,40 (1,16)	4,74 (0,04)

significatifs uniquement dans le cadre d'un séchage à l'air, conditions qui simulent un échantillon séchant à la surface du sol. Ces résultats montrent que les vers et la microflore du sol ingéré, activée par ceux-ci, ont un effet très significatif dans nos conditions d'expérimentation sur la mobilité des ions phosphate ; en particulier, sur les compartiments de phosphore échangeable à court et moyen termes.

Remerciements : Les auteurs remercient très vivement E. Frossard (ETH, Zurich, Suisse) pour l'accès au laboratoire ³²P de l'ENSAIA (INPL, Nancy), sans lequel cette étude n'aurait pu être réalisée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAROIS, I. et LAVELLE, P., 1986. Changes in respiration rate and some physicochemical properties of a tropical soil during transit through *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae: Oligochaeta), *Soil Biol. Biochem.*, 18, p. 539-541.
- FARDEAU, J. C. et FROSSARD, E., 1991. Processus de transformation du phosphore dans les sols de l'Afrique de l'ouest semi-aride : Application au phosphore assimilable, In: Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems, Regional workshop 4: Africa, TIESSEN, H. et FROSSARD, E., éd., Saskatchewan Institute of Pedology, Saskatoon, p. 108-128.
- FARDEAU, J. C. et JAPPÉ, J., 1976. Nouvelle méthode de détermination du phosphore assimilable par les plantes : Extrapolation des cinétiques de dilution isotopique, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 282, série D, p. 1137-1140.
- FARDEAU, J. C., MOREL, J. L. et JAPPÉ, J., 1985. Cinétique d'échange des ions phosphate dans les systèmes sol-solution, Vérification expérimentale de l'équation théorique, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 300, série III, p. 371-376.
- FARDEAU, J. C., 1993. Le phosphore assimilable des sols : sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments, *Agronomie*, 13, p. 317-331.
- JOHN, M. K., 1970. Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant material with ascorbic acid, *Soil Science*, 68, p. 171-177.
- LAVELLE, P., 1981. Stratégies de reproduction chez les vers de terre, *Acta oecol.*, 2, p. 117-133.
- LAVELLE, P., KANYONYO, J. et RANGEL, P., 1983. Intestinal mucus production by two species of tropical earthworms : *Millsonia anomala* (Megaloscolecidae) and *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae), In : *New Trends in Soil Biology*, LEBRUN *et al.*, éd., Dieu-Brichart, Louvain-La-Neuve, p. 405-410.
- LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D., FARDEAU, J. C., NIÑO, M., NANNIPIERI, P. et CHACON, P., 1989. Phosphorus accumulation in savanna termite mound in Venezuela, *Journal of Soil Science*, 40, p. 635-640.
- LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D., LAVELLE, P., FARDEAU, J. C. et NIÑO, M., 1993. Phosphorus transformations in two P-sorption contrasting tropical soils during transit through *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae: Oligochaeta), *Soil Biol. Biochem.*, 25, p. 789-792.
- MARTIN, A., CORTEZ, J., BAROIS, I. et LAVELLE, P., 1987. Les mucus intestinaux de Ver de terre moteur de leurs interactions avec la microflore, *Rev. Écol. Biol. Sol*, 24, p. 549-558.
- SHARPLEY, A. N. et SYERS, J. K., 1976. Potential role of earthworm casts for the phosphorus enrichment of run-off waters, *Soil Biol. Biochem.*, 8, p. 341-346.