

## Disponibilité du phosphore de composts issus de déchets organiques pour le trèfle blanc (*Trifolium repens*)

Ouola Traoré, Sokrat Sinaj, Emmanuel Frossard

Les composts sont utilisés comme fertilisants, notamment phosphatés. Jusque-là, l'efficacité du P des composts dans l'alimentation des plantes n'a été estimée qu'au travers des coefficients apparents d'utilisation. L'efficacité du P des composts par rapport à un engrais minéral soluble dans l'eau varie de 13 à 264 % [1-3]. L'objectif de ce travail est de quantifier dans un système « sol-plante-compost » l'utilisation du P par le trèfle blanc (*Trifolium repens*), en identifiant les formes de P des composts par résonance magnétique nucléaire (RMN) avec extraction séquentielle et en quantifiant la disponibilité du P dans un système « sol-compost ».

### Matériel et méthode

Cette étude a été réalisée sur quatre échantillons (*Eglisau*, *Febraltorf*, *Zürich* et *Leibstadt*) représentatifs des composts suisses issus de déchets de cuisine et d'espaces verts et prélevés en décembre 1995 [4].

O. Traoré : Institut de l'environnement et des recherches agricoles (Inera), BP 910, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.  
<alsanou@fasonet.bf>

S. Sinaj, E. Frossard : École polytechnique fédérale de Zürich (EPFZ), Eschikon 33, Postfach 185, CH-8315 Lindau (ZH), Suisse.

Tirés à part : O. Traoré

Thèmes : Agronomie phytotechnie, Science des sols.

*Eglisau* est issu d'un compostage en tas pendant six semaines de déchets organiques urbains avec aération par retournement du substrat toutes les deux semaines. *Zürich* est fabriqué à partir de déchets organiques de la ville de Zürich, compostés en deux phases : une phase en semi-anaérobie de deux semaines suivie d'une phase aérobie de six semaines. *Febraltorf* est obtenu à partir d'un compostage aérobie pendant six mois. Ce mélange de déchets organiques urbains, de fumier de cheval et de légumes est composté en andain, l'aération étant assurée par des retournements environ tous les deux jours. *Leibstadt* est obtenu par voie semi-aérobie à partir d'un mélange de déchets urbains et de fibres de noix de coco compostés en tas pendant sept mois.

Chaque échantillon moyen est obtenu à partir d'un mélange de compost prélevé à différents points de l'andain sur une profondeur d'environ 20 à 30 cm. Après séchage à température ambiante, les échantillons ont été tamisés à 2 mm pour analyse (tableau 1).

### Caractérisation des formes du P des composts

Le *phosphore total* ( $P_t$ ) est obtenu par digestion de 0,5 g à 1 g de compost dans 20 ml d'acide perchlorique ( $HClO_4$ , 11,6 mol) [5]. Le P extrait est dosé par colorimétrie à 850 nm selon la méthode céruléo-molybdique [6].

Le *phosphore organique* ( $P_o$ ) est obtenu par la méthode de Saunders et Williams [7], le P étant dosé par colorimétrie.

Le *phosphore minéral* ( $P_i$ ) est estimé par différence entre le  $P_t$  et le  $P_o$ .

L'*extraction séquentielle du  $P_i$*  se fait selon la méthode d'analyse du P des boues urbaines [8] (encadré).

Le  $P_i$  résiduel du solide après extraction séquentielle est calculé par différence entre le  $P_i$  total des composts et la somme des quantités de  $P_i$  extraites.

L'*analyse des formes de P par RMN* a été réalisée à l'aide d'un spectromètre Bruker AMX 400 WB en soumettant les échantillons à une fréquence de 161,98 MHz et en les faisant tourner à l'angle magique ( $54,74^\circ$ ) à une vitesse comprise entre 6 et 8 kHz. Les échantillons ont été soumis à deux types de pulsations : une séquence de pulsation simple (SP) et un temps de relaxation de 20 secondes pour  $^{31}P$ , et une séquence de polarisation croisée (CP) avec un temps de relaxation de 3 secondes pour  $^1H$ . Les pics observés sur les spectres sont caractérisés par leur déplacement chimique ( $\delta_{iso}$  ppm) et par leur largeur à mi-hauteur ( $\Delta\nu^{1/2}$  Hz). Les déplacements chimiques sont mesurés par rapport à un signal externe de  $NH_4H_2PO_4$  qui se situe lui-même à 0,72 ppm par rapport à celui obtenu avec une solution de  $H_3PO_4$  à 85 %.

Les analyses en SP et CP ont été effectuées sur les quatre composts. Les échantillons de *Eglisau* et *Zürich* ont été ensuite analysés en SP et en CP après extraction à l'eau, après extractions successives à l'eau

Tableau 1

## Principales caractéristiques chimiques des quatre composts

Compost	pH	C/N	C <sub>t</sub>	N <sub>t</sub>	P <sub>t</sub>	P <sub>i</sub>	P <sub>o</sub>	Ca <sub>t</sub>	Fe <sub>t</sub>	r(1)/R	C <sub>p</sub> (mg P/l)	E		
												E(1 min)	E(1 min-3 mois)	E(> 3 mois)
												g/kg		
Eglisau	8,8	13,6	232	17	3,2	2,4	0,8	43	11	0,96	5,05	530	170	1 670
Zürich	8,6	14,6	190	13	3,4	3,0	0,4	184	4	0,98	1,99	210	160	2 620
Fehraltorf	8,8	11,5	162	14	3,8	2,5	1,3	45	15	0,95	3,64	390	160	1 980
Leibstadt	8,0	21,1	169	8	4,8	4,1	0,7	115	15	0,80	0,99	120	820	3 180

## Main chemical characteristics of the four composts

et au NaHCO<sub>3</sub>, et après extractions successives à l'eau, au NaHCO<sub>3</sub> et au NaOH. Huit substances de référence ont été analysées : le Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O (produit Fluka, pur à 92 %), le CaHPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O (produit Merck) ; 3 apatites provenant de Suisse : une hydroxyapatite (OHA) et deux fluoroapatites (FA1 et FA2) fournies par la collection des minéraux de l'École polytechnique fédérale de Zürich ; une fluoroapatite (FA3) naturelle de Floride fournie par le « National Bureau of Standards » des États-Unis ; de l'acide désoxyribonucléique (ADN), extrait de cellules reproductrices de saumon, et enfin le myo-inositol hexaphosphate (I6P), C<sub>6</sub>H<sub>16</sub>O<sub>24</sub>P<sub>6</sub>Ca (produit Sigma, pur à 90 %). Tous les échantillons ont été broyés très finement avant analyse.

## Caractéristiques des sols et analyse

Les échantillons de terre proviennent de l'horizon supérieur (0-20 cm) de deux sols agricoles suisses *Sissach* et *Tessin*, choisis pour leur comportement différent vis-à-vis des ions phosphate. *Sissach* est un sol brun calcaire limono-argileux, développé sur des roches calcaires, à pH faiblement basique (7,5) et bien pourvu en matière organique (5 %), avec un complexe absorbant saturé surtout en Ca<sup>2+</sup> (S/T = 91 %). Les taux d'argile et de limon sont respectivement de 48 et 40 %. *Tessin* est un sol brun lessivé à pseudo-gley, de texture sablo-limoneuse avec un pH acide (5,7) et une faible teneur en matière organique et en

cations échangeables (S/T= 42 %), avec un taux de sable de 45 %.

Pour l'expérience d'incubation, l'engrais phosphaté de référence utilisé est le phosphate mono-potassique, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. Les composts ont été incorporés de façon à apporter 50 mg P/kg de terre tamisée à 2 mm, soit environ 350 kg P/ha. Les traitements suivants ont été réalisés sur chaque sol avec trois répétitions par traitement pour chaque date de prélèvement :

- témoin : 500 g de terre sans apport exogène de P ;
- 500 g de terre + 0,11 g de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> ;
- 500 g de terre + 8,25 g de *Eglisau* ;
- 500 g de terre + 7,62 g de *Zürich* ;
- 500 g de terre + 6,98 g de *Fehraltorf* ;
- 500 g de terre + 5,50 g de *Leibstadt*.

Après mélange, les sols sont placés dans des pots en plastique puis humidifiés à 80 % de la capacité au champ. Les pots sont incubés à 25 °C dans une chambre climatisée à 80 % d'humidité relative selon un dispositif en randomisation totale. L'humidité des pots est maintenue à 80 % de la capacité au champ par des apports quotidiens d'eau distillée. L'analyse de l'évolution du P dans les sols est faite après 0, 1, 2, 4, 8, 16 et 32 semaines d'incubation sur des échantillons préalablement séchés à l'air.

La méthode des cinétiques d'échanges isotopiques [9, 10] a été utilisée pour caractériser l'évolution du P échangeable dans les sols amendés sur la base du pouvoir fixateur des sols [r(1)/R], la concentration des ions phosphate dans la solution (C<sub>p</sub>) et du P immédiatement échangeable [E(1min)], le rapport sol/solution étant de 1:10. Le calcul de la quantité d'ions phosphate isotopiquement échangeable et directement utilisable par les végétaux est effectué au moyen de la formule :

$$E(1 \text{ min}) = 10 C_p * R/r(1).$$

## Encadré

## Méthode d'extraction séquentielle et d'analyse du P des composts

Compost (1 g)

- ➔ + 200 ml H<sub>2</sub>O  
Agitation 16 h, puis centrifugation à 2 500 g pendant 15 min, filtration à 0,025 µm et dosage du P<sub>i</sub> en solution [6].
- ➔ + 200 ml NaHCO<sub>3</sub> (0,5 mol ; pH 8,5)  
Agitation 16 h, puis centrifugation à 2 500 g pendant 15 min, filtration à 0,025 µm et dosage du P<sub>i</sub> en solution.
- ➔ + 200 ml NaOH (0,1 mol)  
Agitation 16 h, puis centrifugation à 2 500 g pendant 15 min, filtration à 0,025 µm et dosage du P<sub>i</sub> en solution.
- ➔ + 200 ml HCl (1 mol)  
Agitation 16 h, puis centrifugation à 2 500 g pendant 15 min, filtration à 0,025 µm et dosage du P<sub>i</sub> en solution.

## Expérience en vase de végétation

### Marquage du sol et préparation du mélange « sol-compost »

Pour marquer le phosphore du sol [10], une solution de  $^{33}\text{PO}_4$  sans entraîneur est apportée à raison de 4,97 MBq/kg de terre pour le sol *Tessin* et 8,7 MBq/kg de terre pour le sol *Sissach*. L'ensemble est brassé jusqu'à être homogène. Après apport de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  et de composts, le mélange est homogénéisé à nouveau puis réparti dans des pots.

Les cultures sont pratiquées dans des pots en plastique de section carrée dans lesquels on place 1 kg de terre, humectée à 80 % de la capacité au champ. Le trèfle blanc (*Trifolium repens*, variété *Milkanova*) est semé à raison de 0,8 g/m<sup>2</sup> [11], soit 5 à 6 graines par pot. Le P apporté par les graines (20 à 23 µg P/kg de terre) est négligeable par rapport aux quantités de P incorporées. Le dispositif expérimental est placé en blocs randomisés (6 traitements × 4 blocs × 2 sols) soit un total de 48 pots. Les six traitements appliqués sont ceux de l'expérience d'incubation (témoin sans apport exogène de P, traitements avec les composts *Eglisau*, *Zürich*, *Fehraltorf*, *Leibstadt* et traitement avec une solution d'engrais  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ). Le P est apporté à la dose constante de 50 mg P/kg de terre.

Les cultures ont été conduites dans un phytotron réglé à 25 °C, avec 75 % d'humidité relative et à raison de 16 heures de lumière par jour. L'humidité des sols est maintenue à 80 % de leur capacité au champ par des apports journaliers d'eau

distillée. Le trèfle a été inoculé une semaine après la levée par la souche RBL 5020 de *Rhizobium trifolii*. Quatre coupes ont été effectuées sur les parties aériennes 6, 10, 13 et 16 semaines après le semis. Après la levée des cultures et après chaque coupe, la solution nutritive suivante était ajoutée par pot : 60 mg K (sous forme de  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), 2 mg Cu (sous forme de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), 2 mg Mn (sous forme de  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), 1 mg Zn (sous forme de  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), 1 mg B (sous forme de  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), 0,1 mg Mo (sous forme de  $\text{MoO}_3$ ).

À chaque coupe, on a mesuré sur les parties aériennes la matière sèche (MS), la concentration en P et la concentration de la radioactivité dans la matière sèche après correction de l'effet *quenching*. Dans tous les cas, la plante entière contenait plus de 30 mg N/g MS [12].

### Quantification du P prélevé par la plante et provenant de l'engrais (Pdff)

Pour les plantes développées dans les traitements ayant reçu un engrais phosphaté, on peut écrire l'égalité suivante :

$$P_{\text{engrais}} = P_{\text{fertilisé}} - [P_{\text{témoin}} * (r_{\text{fertilisé}} / r_{\text{témoin}})] \quad [10].$$

Où :

$P_{\text{engrais}}$ ,  $P_{\text{fertilisé}}$  et  $P_{\text{témoin}}$ , tous exprimés en mg P/kg de terre, représentent respectivement la quantité de P dans la plante provenant de l'engrais, le P total prélevé par la plante dans le sol fertilisé à l'engrais phosphaté et le P prélevé par la plante dans le sol témoin ;  $r_{\text{fertilisé}}$  et  $r_{\text{témoin}}$  en MBq/kg de terre représentent respectivement la radioactivité des plantes récoltées sur le sol fertilisé et sur le sol témoin.

La fraction de P présente dans la plante et provenant de l'engrais (Pdff%) et le coefficient réel d'utilisation du P des engrais par la plante (CRU%) deviennent respectivement :

$$\text{Pdff} (\%) = 100 * P_{\text{engrais}} / P_{\text{fertilisé}}$$

$$\text{CRU} (\%) = 100 * P_{\text{engrais}} / P_{\text{apporté}}$$

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statgraphics.

## Résultats et discussion

### Caractérisation des formes du P des composts

Le  $P_t$  des composts varie entre 3 à 5 g P/kg et la proportion de  $P_o$  par rapport au P total varie de 12 à 14 % pour *Zürich* et *Leibstadt* et de 27 à 33 % pour *Eglisau* et *Fehraltorf* (tableau 1). La fraction du  $P_i$  extractible à l'eau varie entre 2,9 et 22,5 %. Les proportions de  $P_i$  extraites par  $\text{NaHCO}_3$  sont pratiquement identiques dans tous les composts. L'hydroxyde de sodium extrait ensuite entre 8 et 22,4 % du  $P_i$ . Enfin, HCl extrait 36, 50, 36 et 32 % du  $P_i$  total des composts *Eglisau*, *Zürich*, *Fehraltorf* et *Leibstadt* respectivement. La proportion de  $P_i$  extractible par  $\text{H}_2\text{O}$  ou  $\text{NaHCO}_3$ , et considérée comme facilement assimilable [13, 14], se situe entre 27 et 53 %. Plus de 50 % du  $P_i$  des composts est sous forme complexe et extractible par NaOH ou HCl (tableau 2).

Les résultats obtenus par RMN sur les composts non extraits donnent des spectres présentant des pics avec des  $\delta_{\text{iso}}$  situés entre 2,0 et 2,7 ppm et des largeurs de pic à mi-hauteur ( $\Delta\nu^{1/2}$ ) compris entre 542 et 893 Hz (tableau 3). Les valeurs de  $\Delta\nu^{1/2}$  des composts, qui sont élevées par rapport à celles observées dans les échantillons minéraux de référence, suggèrent la présence d'un mélange de phosphates de calcium (phosphate monocalcique ou dicalcique et/ou phosphates organiques de type acide phytique ou AND) (tableau 3). Des analyses en RMN du solide ont été ensuite effectuées sur le résidu du solide après l'extraction séquentielle du P des composts *Eglisau* et *Zürich*.

Pour *Eglisau*, les paramètres  $\delta_{\text{iso}}$  et  $\Delta\nu^{1/2}$  observés en SP restent pratiquement identiques pour toutes les extrac-

Tableau 2

### Fractionnement des formes de P des quatre composts urbains

Composts	<i>Eglisau</i>	<i>Zürich</i>	<i>Fehraltorf</i>	<i>Leibstadt</i>
	g P.kg <sup>-1</sup>			
Extractant				
H <sub>2</sub> O	0,54 (0,02)	0,31 (0,03)	0,41 (0,01)	0,12 (0,01)
NaHCO <sub>3</sub>	0,74 (0,02)	0,78 (0,01)	0,87 (0,03)	0,99 (0,01)
NaOH	0,40 (0,01)	0,27 (0,03)	0,20 (0,01)	0,92 (0,06)
HCl	0,86 (0,06)	1,51 (0,14)	0,91 (0,15)	1,32 (0,15)
P <sub>i</sub> extrait	2,54 (0,11)	2,87 (0,21)	2,39 (0,20)	3,35 (0,23)
P <sub>i</sub> résiduel	–	0,12	0,14	0,77

Les chiffres représentent les valeurs moyennes de quatre mesures et les chiffres entre parenthèses, les écarts types.

### Sequential extraction of the four urban composts P forms

tions (figure 1). En CP, les spectres avec des  $\delta_{iso}$  compris entre 2,2 et 2,8 ppm dans le compost original *Zürich* et dans l'échantillon extrait à l'eau indiquent la présence de phosphates octo (figure 2) et dicalciques qui ont des  $\delta_{iso}$  situés entre 0 ppm et - 2 ppm (tableau 3). Le fait que le spectre final observé après extraction à la soude du compost *Zürich* donne toujours un  $\delta_{iso}$  de 2,0 ppm et que le reste du P non extrait soit soluble dans HCl montre qu'une large fraction du P de ce compost est sous forme de phosphates de calcium. L'épaulement observé en SP entre - 1 et - 7 ppm et en CP entre - 0,5 et - 3,5 ppm dans le compost original *Zürich*, le compost extrait à l'eau et au bicarbonate, mais qui disparaît du spectre après l'extraction à la soude confirme la présence de composés de type diesters.

## Dynamique du P dans le système sol-compost

### Étude de l'échangeabilité du P des quatre composts

La concentration des ions phosphate dans la solution (Cp) varie de 1 mg P/l pour *Leibstadt* à 5 mg P/l pour *Eglisau* (tableau 1). Les quatre composts ont des valeurs r(1)/R supérieures à 0,4 et ont, de ce fait, un faible pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphate [9]. E(1 min) représente 3 à 22 % du  $P_i$  des composts, et le P isotopiquement échangeable à moyen terme, E(1 min-3 mois), atteint 20 % du  $P_i$  de *Leibstadt* et représente 5 à 7 % du  $P_i$  des trois autres composts. Le pool des ions phosphate lentement échangeables, E(> 3 mois), représente plus de 70 % du  $P_i$  des composts.

### Statut phosphorique des sols

Les deux sols ont des quantités similaires de P total, mais la disponibilité du phosphore y est très différente. Le faible pouvoir fixateur [r(1)/R = 0,69], la teneur élevée du P dans la solution [Cp = 0,55 mg P/l et la valeur E(1 min) de 7,98 mg P/l] montrent que le phosphore n'est pas un facteur limitant de la production agricole dans le sol *Tessin*. Le sol *Sissach* est peu pourvu en phosphore disponible [Cp = 0,04 mg P/l et valeur E(1 min) de 4,34 mg P/l] et présente un fort pouvoir fixateur avec une valeur de r(1)/R égale à 0,09.

Tableau 3

Dérives chimiques ( $\delta_{iso}$ ), largeur du pic à mi-hauteur ( $\Delta v_{1/2}$ ) et nombre de scans (NS) obtenus pour les quatre composts et les substrats phosphatés de référence par RMN du solide en impulsion simple

Substrat	$\delta_{iso}$ (ppm)	$\Delta v_{1/2}$ (Hz)	NS	Rapport Signal/Bruit	Vitesse de rotation (KHz)
Compost					
<i>Eglisau</i>	2,01	893	2 621	0,70	6
<i>Zürich</i>	2,72	610	368	0,87	6
<i>Fehraltorf</i>	2,18	735	368	0,63	6
<i>Leibstadt</i>	2,47	542	368	0,78	6
Substrats de référence					
CaHPO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (DCDP)	0,37	95	16	4,50	6
Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O (MCP)	- 0,98	190	16	3,75	6
Hydroxyapatite (OHA)	1,491	245	16	1,50	6
Fluoroapatite 1 (FA1)	1,976	305	16	1,45	6
Fluoroapatite 2 (FA2)	1,830	120	16	2,38	6
Fluoroapatite 3 (FA3)	1,296	324	16	1,90	6
Myo-inositol hexaphosphate (I6P)	- 2,83	1 120	16	1,25	6
ADN	- 1,71	560	64	1,96	6

MAS = angle magique spin. Le rapport signal/bruit = 2,5 \* hauteur du signal/largeur maximale du bruit.

Chemical shifts ( $\delta_{iso}$ ), peak half-height wide ( $\Delta v_{1/2}$ ) and number of scans (NS) obtained by high resolution solid state NMR with unextracted samples of the four composts and reference substrates in single pulse (SP) sequence

### Influence des apports de compost sur la disponibilité du P des sols

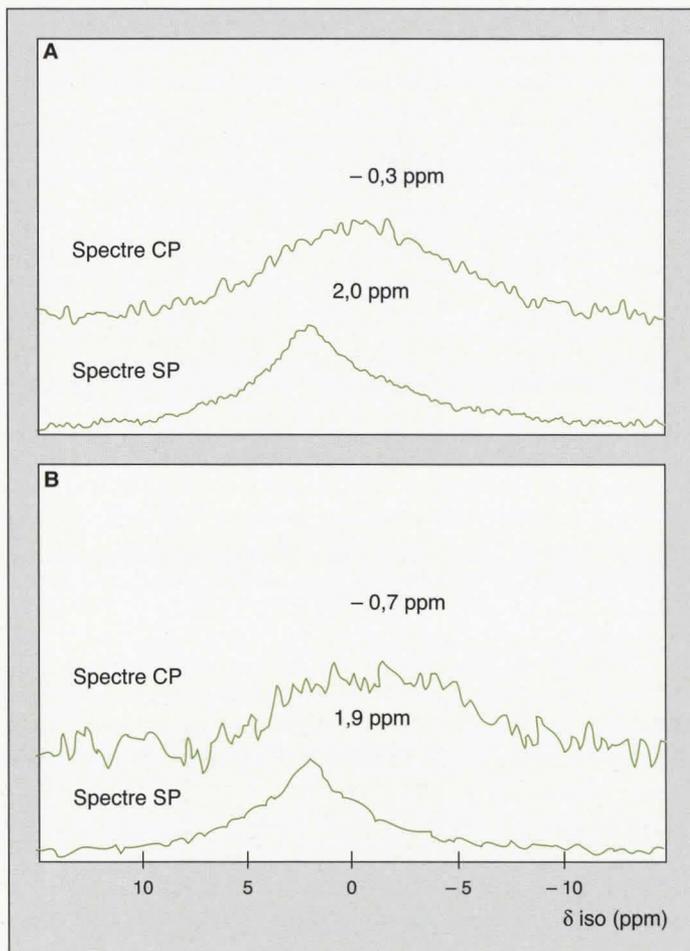
Dans le sol sableux *Tessin*, immédiatement après leur apport, l'engrais KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> multiplie par 3 la valeur de E(1 min) et le compost *Eglisau* la multiplie par 2. Après 16 semaines, tous les traitements possèdent des valeurs E(1 min) proches de la teneur initiale du sol en P rapidement échangeable, soit 8 mg P/kg. En fin d'incubation, les composts ont une efficacité équivalente au KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (figure 3, p. 394). Dans le sol argileux *Sissach*, l'effet des composts sur l'augmentation de E(1 min) atteint son optimum immédiatement après leur apport, puis E(1 min) diminue jusqu'à la semaine 32. Cette baisse de E(1 min) représente la cinétique de fixation des ions phosphate.

### Modélisation des variations du P disponible des sols amendés

Les variations de E(1 min) en fonction du temps t d'incubation, exprimées en mg P/kg de sol, peuvent être modélisées pour tous les points, tous les traitements et les deux sols jusqu'à 32 semaines par l'équation du tableau 4, p. 395 :

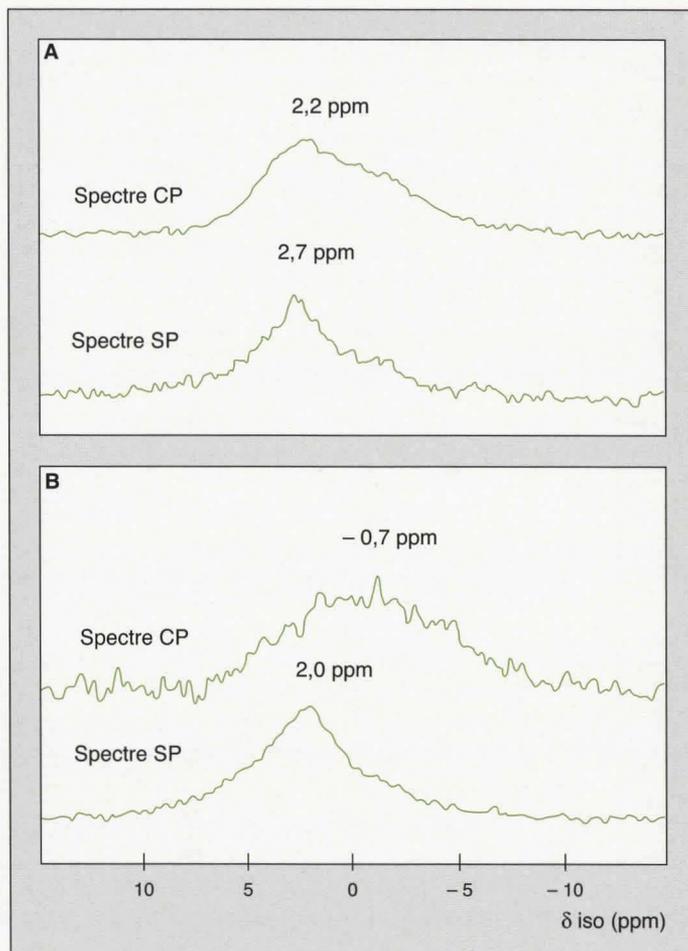
$$E(1 \text{ min})[t] = A * \log(t) + B$$

A est une constante liée à la vitesse de transfert du P du pool des ions libres vers d'autres compartiments et B une constante représentant la quantité E(1 min) après 1 semaine d'incubation. Le paramètre B est lié à la proportion du  $P_i$  du compost représentant E(1 min) dans le cas du sol sableux *Tessin* alors qu'elle est indépendante de ce paramètre dans le cas du sol argileux *Sissach* (figure 4, p. 394). Le modèle montre que, après un an d'incubation, E(1 min) a les valeurs 8,8, 6,4, 7,3 et 4,5 pour le sol *Tessin* avec *Eglisau*, *Zürich*, *Fehraltorf* et *Leibstadt* respectivement. Avec le sol *Sissach*, les valeurs de E(1 min) après un an sont de 4, 3,8, 4,3 et 3,7 avec *Eglisau*, *Zürich*, *Fehraltorf* et *Leibstadt* respectivement. Les caractéristiques des composts *Zürich* (18 % de Ca), *Leibstadt* (11,5 % de Ca ; C/N = 21,1 ; 7 mois de compostage), d'une part, et le fait que *Eglisau* et *Fehraltorf* apportent à la fois les quantités les plus importantes de E(1 min) et les



**Figure 1.** Spectres de  $^{31}\text{P}$  RMN à haute résolution à l'état solide obtenus en impulsion simple (SP) et en polarisation croisée (CP). **A** : pour l'échantillon original ; **B** : après extractions successives à l'eau, au bicarbonate et à la soude pour le compost *Eglisau*.

**Figure 1.** High resolution solid state  $^{31}\text{P}$  NMR spectra obtained in single pulse (SP) and cross polarization (CP) sequences. **A** : on an unextracted sample of the *Eglisau* compost; **B** : on a sample of the same compost extracted with  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaHCO}_3$ , and  $\text{NaOH}$ .



**Figure 2.** Spectres de  $^{31}\text{P}$  RMN à haute résolution à l'état solide obtenus en impulsion simple (SP) et en polarisation croisée (CP). **A** : pour l'échantillon original ; **B** : après extractions successives à l'eau, au bicarbonate et à la soude pour le compost *Zürich*.

**Figure 2.** High resolution solid state  $^{31}\text{P}$  NMR spectra obtained in single pulse (SP) and cross polarization (CP) sequences. **A** : on an unextracted sample of the *Zürich* compost; **B** : on a sample of the same compost extracted with  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaHCO}_3$ , and  $\text{NaOH}$ .

quantités les plus faibles de Ca, d'autre part, expliquent les différences observées au niveau de leur valeur phosphatée résiduelle. La teneur en Ca du compost *Zürich* est probablement le principal responsable de la diminution de la solubilité du P suite à son incorporation au sol.

## Disponibilité du P dans le système « sol-plante-compost »

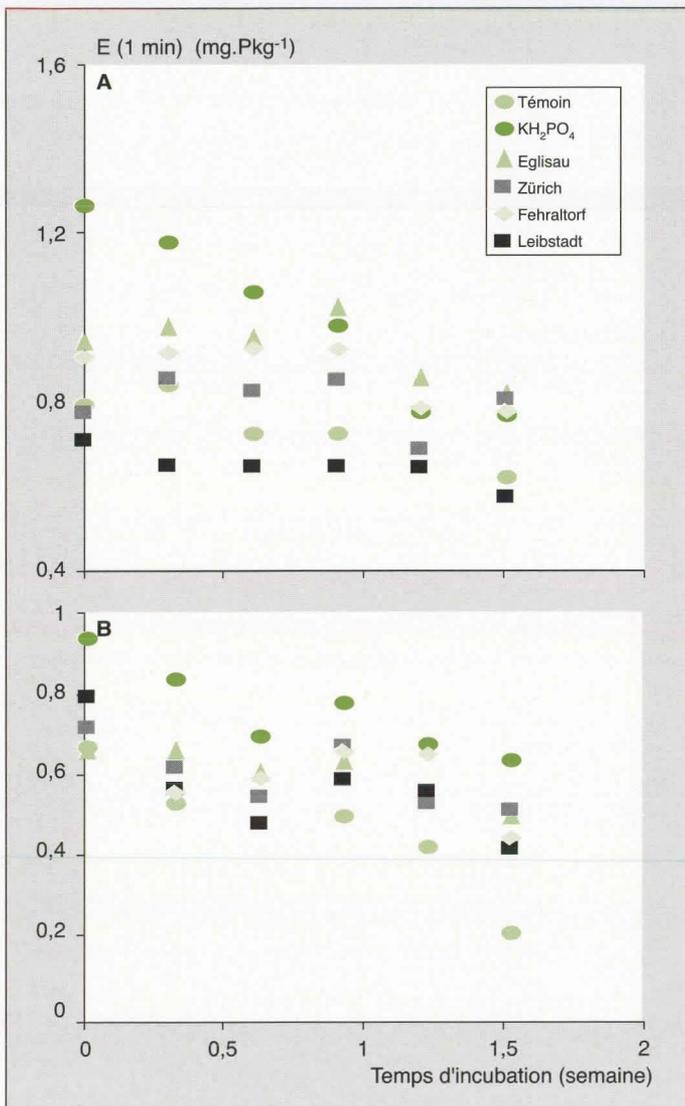
### Production de matière sèche (MS)

La production totale varie entre 9,9 et 16,7 g MS/kg de terre dans le sol *Tessin*

et entre 8,5 et 14,2 g MS/kg de terre pour le sol *Sissach* (tableau 5, p. 395). L'apport de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  n'a pas d'effet significatif sur la production de MS pour le sol *Tessin*, ce qui indique que, dans ce sol, la disponibilité du P n'est pas un facteur limitant de la croissance du trèfle. Dans le sol *Sissach* en revanche, l'apport de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  augmente significativement la production de MS. Pour un même traitement, la production totale de MS est toujours supérieure sur le sol *Tessin* par rapport au sol *Sissach*, sauf pour le traitement  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . L'efficacité des composts *Zürich* et *Leibstadt* dans le sol sableux *Tessin* s'explique par l'amélioration des propriétés physiques de ce sol léger.

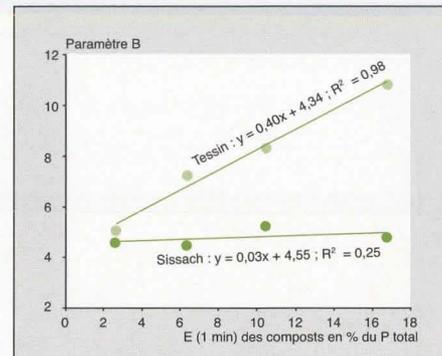
### Exportation du P par la plante

Le P total exporté varie entre 31,4 et 48,1 mg P/kg de terre pour le sol *Tessin* et entre 11,7 et 25,1 mg P/kg de terre pour le sol *Sissach* (tableau 5). Sur le sol *Tessin*, l'exportation plus élevée de P dans les traitements composts s'explique par une plus forte production de MS et une concentration en P plus élevée dans les parties aériennes. L'emploi des composts est bénéfique dans ce sol léger qui contient 45,3 % de sable et les composts semblent davantage jouer un rôle d'amendement. Dans le sol *Sissach* à fort pouvoir fixateur, l'amélioration à court terme de la nutrition phosphatée passe par l'utilisation d'un engrais phosphaté



**Figure 3.** Évolution de E(1 min) au cours de l'expérience d'incubation dans le sol illustrée dans une représentation en coordonnées logarithmiques. **A** : Tessin ; **B** : Sissach.

**Figure 3.** Evolution of E(1 min) during the incubation experiment in the Tessin soil (A) and the Sissach soil (B) in a logarithmic representation.



**Figure 4.** Relation entre le paramètre B de l'équation de modélisation et le pourcentage de P total isotopiquement échangeable en 1 minute des quatre composts.

**Figure 4.** Relationship between parameter B of the equation of modelization and the E(1 min) value of the four composts expressed in percentage of their total P.

que les composts sont plus efficaces que  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Avec la technique isotopique, c'est le P de l'engrais  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  qui a été le mieux utilisé par le trèfle. Une fraction du P organique des composts participe à la nutrition phosphatée de la plante (figure 5).

## Conclusion

Une large variété de formes inorganiques et organiques du P a été identifiée dans les composts. La fraction minérale est essentiellement composée

soluble dans l'eau. Dans ce sol argileux, le compost *Leibstadt* de 7 mois, avec un C/N de 21,1 et à faible teneur en azote, permet d'assurer une meilleure nutrition phosphatée. Dans ce sol lourd, ce compost minéralisé se comporte davantage comme un engrais minéral.

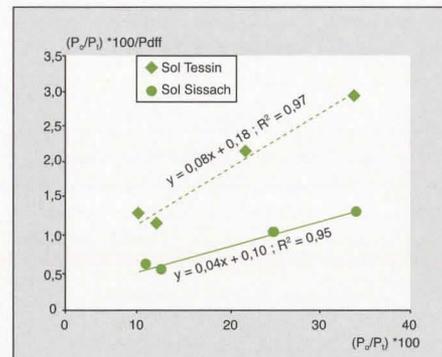
### P prélevé par le trèfle et provenant du fertilisant (Pdff)

Les valeurs Pdff des composts varient entre 8,8 et 12,2 % pour le sol sableux *Tessin* et atteignent 45 à 52 % du Pdff de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Les valeurs Pdff des composts varient entre 21,3 et 27 % et atteignent 88 à 94 % du Pdff de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  dans le sol argileux *Sissach*. Dans le sol sableux, moins de 12 % du P des plantes provient des composts alors que cette proportion atteint 25 % dans le sol argi-

eux. Les valeurs Pdff observées dans le sol *Sissach* sont supérieures à celles obtenues sur le sol *Tessin*; cela est à rapprocher de la relativement faible teneur en P assimilable du sol *Sissach*.

### Coefficient réel d'utilisation du P des engrais (CRU)

Dans le sol sableux *Tessin* à faible pouvoir fixateur, le CRU du P des composts varie entre 7,6 % pour *Zürich* et 12,3 % pour *Leibstadt*. Le P de l'engrais  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  est le mieux utilisé par la plante. Le CRU du P des composts représente 41 à 66 % du CRU du P de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Pour le sol argileux *Sissach*, le CRU du P des composts varie entre 9,7 % pour *Eglisau* et 11,7 % pour *Leibstadt*. Le calcul des coefficients apparents d'utilisation du P apporté montre



**Figure 5.** Relation entre le pourcentage de P organique ( $P_o$ ) des composts  $[(P_o/P_t)*100]$  et le rapport  $[(P_o/P_t)*100]/\text{Pdff}$  moyen des quatre composts pour les deux sols.

**Figure 5.** Relationship between the proportion of organic P ( $P_o$ ) of the composts  $[(P_o/P_t)*100]$  and the ratio  $[(P_o/P_t)*100]/\text{Pdff}$  of the four composts for the two soils.

Tableau 4

**Modélisation des variations de E(1 min) par l'équation**  
**E(1 min) [t] = A \* log (t) + B**

Traitement	Sol Tessin				Sol Sissach			
	A	B	r <sup>2</sup>	Temps pour lequel E(1 min) = 0 (en année)	A	B	r <sup>2</sup>	Temps pour lequel E(1 min) = 0 (en année)
Témoin	-0,6	6,5	0,89		-0,4	03,8	0,69	
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	-2,9	15,8	0,92	4 831	-1,1	7,7	0,90	192 308
Eglisau	-1,2	10,9	0,76	24*10 <sup>6</sup>	-0,5	4,9	0,93	12*10 <sup>7</sup>
Zürich	-0,5	7,3	0,55	76*10 <sup>11</sup>	-0,4	4,5	0,81	38*10 <sup>8</sup>
Fehraltorf	-0,6	8,3	0,60	12*10 <sup>11</sup>	-0,6	5,3	0,67	12*10 <sup>6</sup>
Leibstadt	-0,3	5,0	0,94	96*10 <sup>13</sup>	-0,5	4,6	0,59	30*10 <sup>6</sup>

E(1 min)t est exprimé en mg P/kg de sol et t, le temps d'incubation, est exprimé en semaines.

**Modelling of E(1 min) variations by the equation E(1 min) [t] = A\*log (t) + B**

de phosphates de calcium condensés de type apatitique ou octocalcique avec des concentrations élevées de P minéral soluble dans l'eau. Dans un système sol/compost, le compost agit sur la fraction du phosphore assimilable du sol, prioritairement par la quantité de P très disponible qu'il contient. Un compost augmentera d'autant plus la fertilité phosphatée d'un sol qu'il contient lui-même du P réellement disponible, laquelle diminue avec la durée du compostage. L'addition d'un compost à C/N élevé diminue la fertilité phosphorique du sol sableux le mieux pourvu en P disponible. Il a été montré que les com-

posts sont des sources directes de P pour la plante dans le sol ; ils contribuent à la nutrition des plantes, d'une part, par leur P rapidement assimilable et, d'autre part, par leur P organique. Par ailleurs, en améliorant la fertilité physique du sol sableux, les composts participent à une meilleure nutrition phosphatée de la plante ■

**Remerciements**

Les auteurs remercient l'École polytechnique fédérale de Zürich (EPFZ) en Suisse pour son soutien financier dans la réalisation de cette étude.

**Références**

- McCoy JL, Sikora LJ, Weil RR. Plant availability of phosphorus in sewage sludge compost. *J Environ Qual* 1986 ; 15 : 403-9.
- Frei U, Candinas T, Besson JM. Kompost-ein wertvoller Dünger und Bodenverbesserer, *Agrarforschung* 1997 ; 4 : 463-6.
- Bezzola LC, Lopez SC, Barbaro NO. Effectiveness of different phosphatic fertilizers measured using labelled superphosphate and phosphorus taken up by plants. *Fert Res* 1994 ; 39 : 31-7.
- Traoré O. *Étude de la valeur fertilisante phosphatée des composts*. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France, 1998 ; 113 p.
- Olsen SR, Dean LA. Phosphorus. In: Black CA, et al., eds. *Methods of soil chemical analysis*, part 2. A. *Agronomy* 1965 ; 9 : 1035-49.
- John MK. Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid. *Soil Sci* 1970 ; 109 : 214-20.
- Saunders WMH, Williams EG. Observations on the determination of total organic phosphorus in soils. *J Soil Sci* 1955 ; 6 : 254-67.
- Frossard E, Tekely P, Grimal JY. Characterization of phosphate species in urban sewage sludges by high-resolution solid state <sup>31</sup>P NMR. *Eur J Soil Sci* 1994 ; 45 : 403-8.
- Fardeau JC. Le phosphore disponible des sols : sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *Agronomie* 1993 ; 13 : 317-31.
- Fardeau JC. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fert Res* 1996 ; 45 : 91-100.
- Zanetti S, Hartwig UA, Lüscher A, et al. Stimulation of symbiotic N<sub>2</sub> fixation in *Trifolium repens* L. under elevated atmospheric pCO<sub>2</sub> in grassland ecosystem. *Plant Physiol* 1996 ; 112 : 575-83.
- Bergman W. *Nutritional disorders of plants. Development, visual and analytical diagnosis*. Stuttgart : Gustav Fischer Verlag Jena, 1992 ; 741 p.
- Chang SC, Jackson ML. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci* 1957 ; 84 : 133-44.
- Hedley MJ, Stewart JWB, Chaubau BS. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci Am J* 1982 ; 46 : 970-6.

Tableau 5

**Production de matière sèche (MS) totale, exportation totale de P, valeurs Pdff et CRU obtenues avec le trèfle blanc dans les deux sols**

Traitement	Sol sableux Tessin				Sol argileux Sissach			
	MS totale (g MS/kg terre)	P total exporté (mg P/kg terre)	Pdff (%)	CRU (%)	MS totale (g MS/kg terre)	P total exporté (mg P/kg terre)	Pdff (%)	CRU (%)
Témoin	9,9 <sup>a</sup>	31,37 <sup>a</sup>	-	-	8,46 <sup>a</sup>	11,71 <sup>a</sup>	-	-
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	11,2 <sup>b</sup>	38,96 <sup>b</sup>	23,18 <sup>b</sup>	18,64 <sup>b</sup>	13,33 <sup>bc</sup>	25,08 <sup>c</sup>	29,0 <sup>a</sup>	14,50 <sup>a</sup>
Eglisau	14,3 <sup>c</sup>	45,89 <sup>c</sup>	10,56 <sup>a</sup>	9,42 <sup>a</sup>	12,68 <sup>bc</sup>	19,23 <sup>b</sup>	25,5 <sup>a</sup>	9,72 <sup>a</sup>
Zürich	14,0 <sup>c</sup>	41,88 <sup>b</sup>	8,82 <sup>a</sup>	7,60 <sup>a</sup>	11,91 <sup>b</sup>	22,01 <sup>bc</sup>	21,3 <sup>a</sup>	10,42 <sup>a</sup>
Fehraltorf	14,3 <sup>c</sup>	48,06 <sup>c</sup>	11,43 <sup>a</sup>	11,09 <sup>a</sup>	12,14 <sup>bc</sup>	19,86 <sup>b</sup>	27,1 <sup>a</sup>	10,56 <sup>a</sup>
Leibstadt	16,7 <sup>d</sup>	47,11 <sup>c</sup>	12,19 <sup>a</sup>	12,30 <sup>a</sup>	14,15 <sup>c</sup>	22,35 <sup>bc</sup>	27,0 <sup>a</sup>	11,65 <sup>a</sup>

Les chiffres suivis de la même lettre dans chaque colonne indiquent des traitements statistiquement non différents au seuil de probabilité 5 %.

**Total dry matter (MS), P uptake, Pdff and CRU values obtained with white clover in the 2 soils**

## Summary

### Availability of urban waste composts P for white clover (*Trifolium repens*)

O. Traoré, S. Sinaj, E. Frossard

The objective of this study was to quantify the P released by a compost and taken up by a plant (*Trifolium repens*). Four organic waste composts derived from urban wastes were used (table 1). The results of the characterization of P species showed that compost P was mainly present in inorganic form and indicated the dominance of Ca-P (tables 2 and 3, figures 1 and 2). Organic forms of compost P were also detected. The changes in the quantity of free phosphate in compost-amended soils were measured during an incubation experiment carried out on two Swiss soils: the Tessin soil with a low sorbing-P and a high water-soluble P contents and the Sis-sach soil which had a high sorbing-P capacity and a low water-soluble P contents. P exchangeability in the four composts and the two soils was characterized by the isotopic exchange kinetic method. Composts were incorporated into the soils at a constant rate of 50 mg P/kg of soil. The rapidly exchangeable P [E(1min)] variations in the compost-amended soils were modelled as shown in table 4 and figure 3 and confirmed that the two soils were different (figure 4). The variations of E(1min) increase were explained by the compost contents in total Ca and rapidly exchangeable P. Compost incorporation into the soil led to an increase of white clover biomass production and its P uptake (table 5). The values of P derived from fertilizer (Pdff) were higher in the high sorbing-P capacity soil compared to those obtained in the low sorbing-P capacity soil. The effective coefficient of compost P utilization (CRU) by white clover was less than 12% (table 5). Composts are involved in plant nutrition by the release of their rapidly available P and their organic P as shown in figure 5.

Cahiers agricultures 2001 ; 10 : 389-96.

## Résumé

L'objectif de cette étude est de quantifier l'utilisation du P de composts issus de déchets organiques urbains par le trèfle blanc (*Trifolium repens*). Les résultats montrent que la proportion de P minéral ( $P_i$ ) des composts facilement assimilable se situe entre 27 et 53 % et qu'une large fraction de ce phosphore est soit associée aux matières humiques, aux argiles ou aux oxydes, soit précipitée sous forme de phosphates de calcium ou de magnésium. Dans un système « sol-compost », le compost a augmenté d'autant plus la fertilité phosphatée d'un sol qu'il contenait lui-même du P réellement disponible. En présence de la plante, l'apport des composts au sol induit une augmentation de la production de matière sèche et accroît l'exportation du P. Les valeurs Pdff varient entre 9 et 12 % pour le sol sableux contre 21 à 27 % pour le sol argileux. Le coefficient réel d'utilisation (CRU) du P des composts par la plante demeure identique pour les deux sols et se situe entre 7 et 12 %.