

# Effet d'apports de composts sur la disponibilité de micropolluants métalliques et organiques dans un sol cultivé

S. Houot<sup>(1)</sup>, Ph. Cambier<sup>(1)(2)</sup>, P. Benoit<sup>(1)</sup>, M. Deschamps<sup>(1)</sup>, A. Jaulin<sup>(2)</sup>, C. Lhoutellier<sup>(3)</sup> et E. Barriuso<sup>(1)</sup>

1) INRA, UMR 1091 Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval Grignon, France

2) INRA, PESSAC, Route de Saint Cyr, 78026 Versailles Cedex, France

3) CREED, Veolia Environnement RetD, 78520 Limay, France

## RÉSUMÉ

Les effets à moyen terme du recyclage en agriculture de composts sur les caractéristiques physico-chimiques et la composante biologique de sols cultivés, incluant microflore et faune, ont été évalués dans un essai au champ mis en place en 1998. Les composts sont avant tout des matières organiques dont l'apport augmente la fertilité et l'activité biologique du sol. Mais ils sont aussi vecteurs de polluants organiques et métalliques (ETM) en faibles concentrations. Leurs applications répétées pourraient avoir un effet perturbateur sur le fonctionnement biologique des sols, en raison du cumul de faibles doses de polluants. Après 9 ans d'expérimentation, 5 épandages de composts de boue (DVB) et d'ordures ménagères résiduelles (OMR) ont conduit à une différenciation des caractéristiques physico-chimiques des sols comme le pH, les teneurs en C et N organique. Les apports de composts ont augmenté significativement les teneurs en Cuivre et Zinc total dans les horizons de surface. Cette évolution est peu ou pas visible pour les autres ETM.

Les épandages de composts augmentent le compartiment de matière organique particulaire [50 µm -5 mm] légère, séparée par fractionnement granulo-densimétrique, surtout dans le traitement DVB. Cette fraction est plus riche en matière organique et en certains ETM. Les apports de composts augmentent les ETM extractibles à l'EDTA (fraction potentiellement mobilisable) de façon plus marquée que les ETM totaux. En revanche, les proportions d'ETM échangeables les plus disponibles (moins de 1 % des ETM totaux), sont modulées par les effets des composts sur le pH du sol. Les concentrations en HAP sont de l'ordre de grandeur des concentrations mesurées dans les sols cultivés. Les concentrations en HAP sont supérieures dans les matières organiques particulières qui concentrent ces polluants sans différence significative entre les traitements. Les résultats des effets sur les composantes biologiques du sol sont présentés dans 2 autres articles de cette même revue.

## Mots clés

*Compost, Élément Trace Métallique (ETM), spéciation, HAP, essai de longue durée, fractionnement granulo-densimétrique.*

**SUMMARY****EFFECT OF REPEATED COMPOST APPLICATIONS ON AVAILABILITY OF ORGANIC AND METALLIC MICROPOLLUTANTS IN SOIL**

The effects at medium term of repeated compost spreading on cultivated soil on the physico-chemical characteristics and biological activity, including soil microflora and earthworm population, have been studied in a field experiment started in 1998. The composts are organic amendments that increased soil fertility. They brought also small concentrations in heavy metals (HM) and organic micropollutants (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH). Their repeated applications could disturb the biological functioning of a soil, in relation with progressive accumulation of pollutants. After 9 years of experimentation, 5 spreading of sludge compost and municipal solid waste compost have modified physico-chemical characteristics of soil such as pH, organic matter contents... Total Cu and Zn concentrations in soil also significantly increased. Such evolution was not noticeable for the other HM and PAH. The PAH concentration in soil corresponded to usual concentrations found in cultivated soils. The particulate organic matter [50  $\mu\text{m}$  -5 mm] increased in soil after compost application, mainly with sludge compost. The HM and PAH concentrations were larger in this particulate organic matter compared to total soil. The fraction of HM extractable with EDTA increased compared to control more than total HM in soil receiving composts. However the exchangeable fraction of HM (< 1 % total HM) was mitigated by the effect of compost on soil pH. The effects of compost application on microflora and earthworm population are presented in other papers of the present journal.

**Key-words**

Compost, trace elements, speciation, PAH, long-term field experiment, particle size fractionation.

**RESUMEN****EFFECTOS DE APORTES DE COMPOSTES SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE MICRO-CONTAMINANTES METÁLICOS Y ORGÁNICOS EN UN SUELO CULTIVADO**

Se evaluaron los efectos a mediano plazo del reciclaje en agricultura de compostes sobre las características físico-químicas y el componente biológico de los suelos cultivados, incluyendo microflora y fauna en un ensayo de campo establecido en 1998. Los compostes están sobre todo materias orgánicas cuyas aporte aumenta la fertilidad y la actividad biológica del suelo. Pero están también vectores de contaminantes orgánicos y metálicos (ETM) en pequeñas concentraciones. Sus aplicaciones repetidas podrían tener un efecto perturbador sobre el funcionamiento biológico de los suelos, en razón del cúmulo de pequeñas dosis de contaminantes. Después de 9 años de experimentación, 5 esparcimientos de compostes de lodo (DVB) y de basuras domésticas residuales (OMR) condujeron a una diferenciación de las características físico-químicas de los suelos como el pH, los contenidos en C y N orgánico. Los aportes de compostes aumentaron significativamente contenidos en Cobre y en Zinc total en los horizontes de superficie. Esta evolución está poco o no visible para los otros ETM.

Los esparcimientos de compostes aumentan el compartimento de materia orgánica particular (50  $\mu\text{m}$  - 5 mm) liviana, separada por fraccionamiento granulo-densimétrico, sobre todo en el tratamiento DVB. Esta fracción está más rica en materia orgánica y en ciertos ETM. Los aportes de compostes aumentan los ETM extractables al EDTA (fracción potencialmente disponibles de manera más marcada que los ETM totales). En cambio, las proporciones d'ETM intercambiables los mas disponibles (menos de 1 % de los ETM totales), se modulan por los efectos de los compostes sobre el pH del suelo.

**Palabras clave**

Compostes, elementos en trazas metálicos, especiación, HAP, ensayo de larga duración, fraccionamiento granulo-densimétrico

Le recyclage en agriculture de produits résiduels organiques (PRO) est une pratique ancienne qui se justifie pleinement par leur valeur agronomique. Les PRO épandus sont avant tout des matières organiques (MO) et les effets positifs des épandages sont ceux généralement associés à tout apport de MO : stimulation globale des populations microbiennes ou de la faune, amélioration des propriétés des sols liées à la teneur en MO (amélioration de la stabilité de la structure, augmentation de la disponibilité des éléments fertilisants...). Les PRO sont également vecteurs de micropolluants organiques (composés traces organiques, CTO) ou métalliques (éléments en traces métalliques, ETM) mais les flux d'entrée sont faibles par rapport aux stocks présents naturellement dans les sols (Houot *et al.*, 2002) ou même par rapport à d'autres flux tels que ceux associés, selon les cas, aux engrais, aux traitements phytosanitaires ou aux dépôts atmosphériques (Alcock *et al.*, 1995; Barriuso *et al.* 1996; Sogreah, 2007). En conséquence, les effets éventuels ne seront observables qu'à long terme et en cas d'épandages répétés, pouvant générer des effets cumulatifs de faibles doses de plusieurs polluants. De nombreux travaux ont été conduits sur les effets à court ou moyen terme d'apports massifs de produits souvent fortement contaminés (Juste et Mench, 1992; McGrath *et al.*, 2000), qui ne sont pas représentatifs des pratiques réglementaires actuelles. Si les CTO se dissipent plus ou moins rapidement dans les sols, les ETM s'accumulent en surface (Jackson et Alloway, 1991; Planquart *et al.*, 1999; Chang *et al.*, 1984; Madrid *et al.*, 2007; Hargreaves *et al.*, 2008; Smith, 2009). Cependant, les PRO apportés, sources d'ETM, tendent aussi à limiter leur disponibilité en raison de la forte affinité intrinsèque entre matière organique et métaux en traces. Cependant la minéralisation lente de cette MO après arrêt des apports conduirait à une libération de ces éléments sous des formes plus disponibles (McBride, 1995; Smith, 2009). Il est par contre assez bien établi que le compostage tend à réduire la disponibilité de métaux présents dans des déchets organiques et dégrade certains CTO (Leita et De Nobili, 1991; Martens, 1982; Pakou *et al.*, 2009; Richards *et al.*, 2000; Smith, 2009).

Les PRO en tant que matières organiques vont s'incorporer aux MO du sol et donc participer à leur cycle biogéochimique. En fonction de la taille granulométrique des fractions de MO (sol et PRO), leur dynamique sera différente et il est maintenant admis que les MO associées aux fractions grossières du sol (> 50 µm) sont des MO jeunes ayant un turnover rapide (Balesdent, 1996). Cela pourrait avoir des conséquences sur la spéciation des polluants et leur disponibilité vis-à-vis de la microflore et de la faune.

Le risque pour la faune et la microflore du sol, ainsi d'ailleurs que pour les végétaux cultivés sur les sols amendés par des PRO, est difficile à évaluer car cela suppose une mesure de l'exposition dans ces systèmes soumis à une dynamique complexe. Le plus

souvent, seules les teneurs totales en polluants sont suivies sans évaluation de leur biodisponibilité. Les processus impliqués sont en partie les mêmes que ceux régulant les risques de transfert vers les eaux profondes. L'étude de la spéciation des éléments traces ou de l'extractibilité des CTO dans le milieu récepteur et vecteur, en l'occurrence le sol, permet d'approcher la mesure d'exposition des organismes vivants du sol.

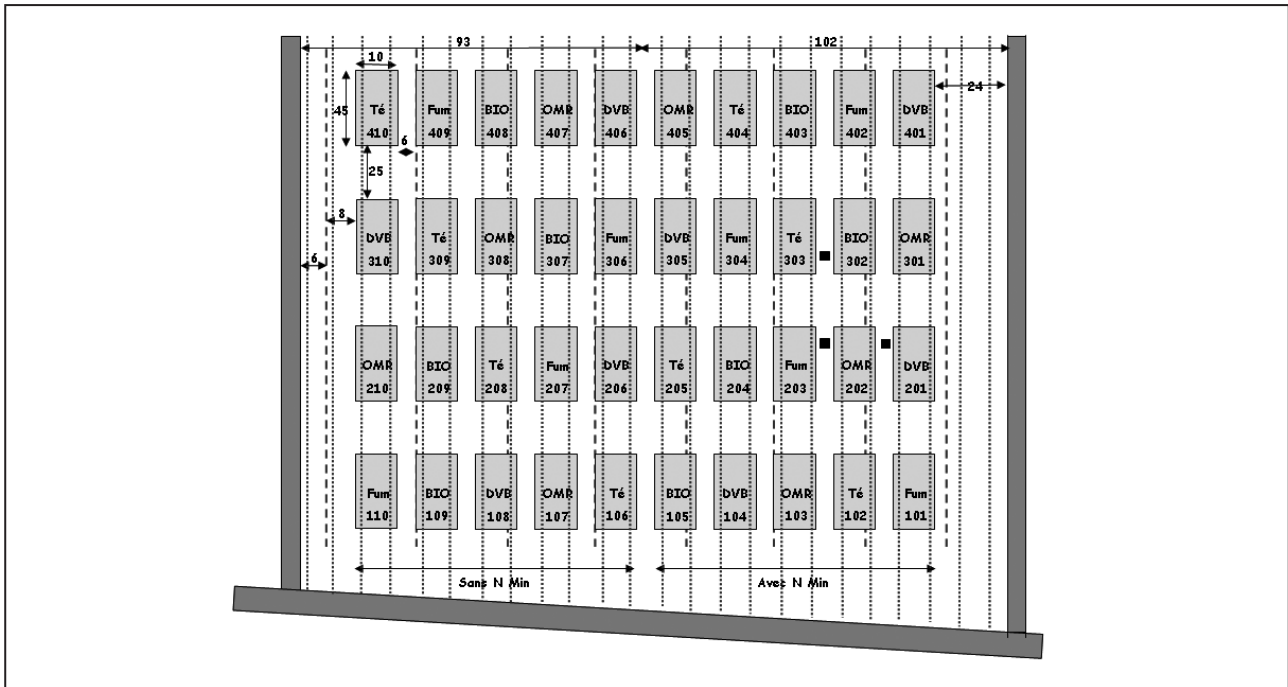
Par ailleurs, pour appréhender les effets cumulatifs de flux faibles mais répétés de contaminants associés à des épandages conformes à la réglementation et aux pratiques courantes en agriculture, les dispositifs expérimentaux au champ de longue durée sont indispensables.

L'objectif du travail présenté est d'évaluer les impacts à moyen terme de l'épandage de PRO sur les caractéristiques de la composante biologique de sols cultivés, incluant microflore et faune. En fonction des effets observés, les populations testées seront proposées comme bioindicateurs d'impact dont la réponse sera reliée à l'état des polluants dans les sols. Les mesures sont réalisées dans un essai de longue durée où des apports répétés de différents PRO ont différencié les caractéristiques de l'horizon labouré. Elles incluent : (1) la structure des communautés microbiennes, (2) la taille, la diversité et l'activité des lombrics ; (3) la qualité chimique des sols soumis aux épandages. Les mesures biologiques sont faites à différents pas de temps entre 2 épandages, la variation des réponses dans des traitements n'ayant pas reçu d'épandage devant permettre d'appréhender les variations « naturelles » des indicateurs qui seront comparées à l'intensité des variations dans les traitements soumis à épandage. Les résultats concernant les cibles biologiques sont présentés dans Leyval *et al.* (2009) et Capowiez *et al.* (2009) dans cette même revue. Les effets des apports sur la qualité chimique du sol sont présentés ici. La caractérisation de l'état des polluants inclut leur localisation dans des fractions granulo-densimétriques de sol, en particulier dans les fractions grossières de la MO, pour leur turnover rapide et leur rôle dans l'activité des microorganismes et d'une partie de la faune du sol ; et la spéciation des ETM selon des méthodes d'extractions chimiques.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Site d'étude

Le dispositif expérimental au champ « Qualiagro » a été mis en place en 1998 (collaboration INRA-VEOLIA Environnement). Il est situé à la limite des communes de Feucherolles et d'Orgeval sur le plateau des Alluets-le-Roi (Yvelines). Le sol est de type limoneux lessivé hydromorphe d'une profondeur supérieure à 1,2 m (luvisol rédoxique d'après le référentiel pédologique français) et se développe à partir d'un limon loessique carbonaté qui apparaît vers 1,50 m.

**Figure 1:** Plan du dispositif au champ.**Figure 1:** Map of the field experiment.**Tableau 1:** Comparaison des caractéristiques analytiques de l'horizon labouré du sol de l'essai au champ avec la moyenne des horizons labourés des sols cultivés de même type de la région (10 sols analysés, écart-types entre parenthèses).**Table 1:** Comparison of chemical characteristics in the ploughed horizon of the field experiment with other similar cultivated soils of the same geographical area (10 soils analyzed, SD in parenthesis).

	Argile	Limon	Sable	C	CEC	pH	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	Hg
	(g kg <sup>-1</sup> )				Meq 100g <sup>-1</sup>		(mg kg <sup>-1</sup> )					(μg kg <sup>-1</sup> )	
Essai	150	783	67	11,0	9,4	6,9	11,6	49,2	45,3	15	25,3	232	91
	(10)	(20)	(9)	(0,8)	(0,6)	(0,2)	(0,9)	(3,4)	(2,7)	(0,9)	(6,1)	(13)	(16)
Autres sols	187	721	92	13,3	9,5	6,6	20,3	52,3	46,3	19,8	38	271	141
	(23)	(32)	(37)	(3,6)	(1,1)	(0,8)	(7,7)	(3,3)	(5,8)	(3,1)	(13,8)	(59)	(61)

Le dispositif d'une superficie de 6 ha comprend 4 blocs de 10 parcelles (figure 1). Deux facteurs sont étudiés: apport organique et niveau de fertilisation minérale azotée. Les 5 traitements organiques incluent 3 composts d'origine urbaine comparés à un fumier de bovins (vaches laitières en stabulation libre) considéré comme amendement de référence et un témoin sans apport organique (T). Les 3 composts sont: (1) un compost d'ordures ménagères résiduelles, OMR (ordures ménagères résiduelles après collecte sélective des emballages « propres et secs »); (2) un compost de boues, DVB (co-compostage de boues d'épuration urbaines et de déchets verts ou de fragments de palettes); un compost de biodéchets, BIO (collecte sélective de cette fraction co-compostée avec des déchets verts).

Les 5 traitements organiques sont croisés avec 2 niveaux de fertilisation minérale azotée, faible et normale. Pour cela, le dispositif est séparé en deux moitiés correspondant à ces 2 niveaux de fertilisation.

Les parcelles font 450 m<sup>2</sup>. Au sein d'un demi-bloc, les 5 traitements organiques sont répartis de façon aléatoire. Le dispositif est cultivé selon une rotation blé-maïs. Les composts et le fumier sont apportés tous les 2 ans, en fin d'été, sur chaume de blé. Après épandage, la parcelle est déchaumée, ce qui permet d'enfouir les composts. Les apports se font sur la base de la quantité de C organique apporté et 4 t C/ha sont apportés lors de chaque épandage. Au départ de cette étude, 3 épandages ont déjà eu lieu: en

1998, 2000 et 2002. L'étude se déroule entre le 4<sup>e</sup> en 2004 et le 5<sup>e</sup> épandage en 2006.

Avant le premier épandage, un échantillon moyen de l'horizon de surface est prélevé dans chacune des parcelles du dispositif (tableau 1). La teneur en matière organique moyenne est de 1.9 %. Sans un chaulage régulier, le sol aurait tendance à s'acidifier (pH initial de 6.9). Les teneurs initiales en éléments traces métalliques (ETM) du sol du dispositif expérimental sont inférieures à celles de sols cultivés de la région du même type et à la moyenne des teneurs dans les sols français (Baize, 2000). Les teneurs initiales en HAP sont également très faibles et caractérisées par une forte hétérogénéité. Les teneurs initiales en fluoranthène (FLT), benzo(b)fluoranthène (B(b)F), benzo(a)pyrène (B(a)P) et HAP totaux (16 HAP) sont de  $46 \pm 43$ ,  $37 \pm 30$ ,  $24 \pm 23$  et  $302 \pm 262$  µg/kg respectivement.

## Echantillonnage

Les mesures spécifiquement dédiées à ce programme sont effectuées dans 3 traitements (OMR, DVB et T) de la moitié du dispositif recevant une fertilisation minérale, ces traitements étant plus proches des conditions réelles d'utilisation des PRO. Les parcelles du traitement témoin non fertilisé (T-N) sont également échantillonnées afin de comparer les effets de la fertilisation minérale aux effets des PRO. Au total 15 parcelles sont échantillonnées : 4 traitements (OMR, DVB, TN et T0) en 4 répétitions sauf une des parcelles T0.

Pour comparer les effets « apport de PRO » aux variations saisonnières liés aux conditions du milieu (teneur en eau et température du sol, présence de plantes...), les prélèvements se font à différents pas de temps entre 2 épandages : immédiatement avant le 4<sup>e</sup> épandage de PRO au 1<sup>er</sup> septembre 2004 (T<sub>0</sub>), 2, 7, 9, 13 et 24 mois après le 4<sup>e</sup> épandage (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>), 2 mois après le 5<sup>e</sup> épandage en octobre 2006 (T<sub>6</sub>). Les prélèvements de sol effectués à T<sub>0</sub> et T<sub>5</sub> correspondent aux prélèvements régulièrement effectués depuis le départ de l'essai.

A chaque date, un échantillon composite moyen est réalisé dans chaque parcelle dans l'horizon de surface correspondant au labour à partir de 8 échantillons élémentaires. Les prélèvements de sol se font selon une ligne transversale à la parcelle qui progresse le long de la parcelle au fur et à mesure des prélèvements.

Après prélèvement, les échantillons de sol sont immédiatement homogénéisés avant d'être répartis entre les différentes équipes pour analyse chimique ou mesure biologique. Les échantillons destinés aux mesures biologiques sont immédiatement congelés à -20 °C avant envoi aux laboratoires pour mesure de la structure des communautés microbiennes (cf. Leyval *et al.*, 2009). Les échantillons destinés aux analyses chimiques sont séchés à 40 °C. A chaque date d'échantillonnage, les vers de terre sont prélevés sur 4 surfaces de sol de 0,36 m<sup>2</sup>

sur lesquelles les vers sont attirés vers la surface à l'aide de solution de moutarde diluée. Les lignes de prélèvement de vers progressent le long des parcelles échantillonnées comme précédemment (cf. Capowiez *et al.*, 2009).

Lors de chaque épandage, les PRO sont échantillonnés et séchés à 40° pour analyses et fractionnement granulométrique. Une partie des échantillons de PRO est conservée au froid (-20 °C) et envoyés aux équipes de microbiologistes où sont réalisées les mesures de structure des communautés microbiennes.

## Description des bioindicateurs

Deux indicateurs biologiques ont été choisis dans le cadre de cette étude : la structure des communautés microbiennes et les lombriciens. Les méthodes et les résultats obtenus sont présentés dans les articles de Leyval *et al.* et Capowiez *et al.* dans ce même numéro.

## Analyses totales

Avant chaque épandage, des prélèvements de sol sont effectués dans l'horizon de surface de chaque parcelle correspondant à l'horizon de labour et d'enfouissement des composts. Les analyses sont les mêmes à chaque campagne et correspondent à celles faites initialement pour caractériser les sols au départ de l'essai : C, N, pH, majeurs, Cd, Cu, Ni, Cr, Zn, Pb, Hg et 16 HAP (tous les 4 ans seulement). Les analyses sont réalisées au Laboratoire d'Analyses des Sols INRA d'Arras. Les composts prélevés à chaque épandage y sont également envoyés pour analyse des mêmes paramètres.

## Evaluation de l'exposition aux polluants organiques et métalliques

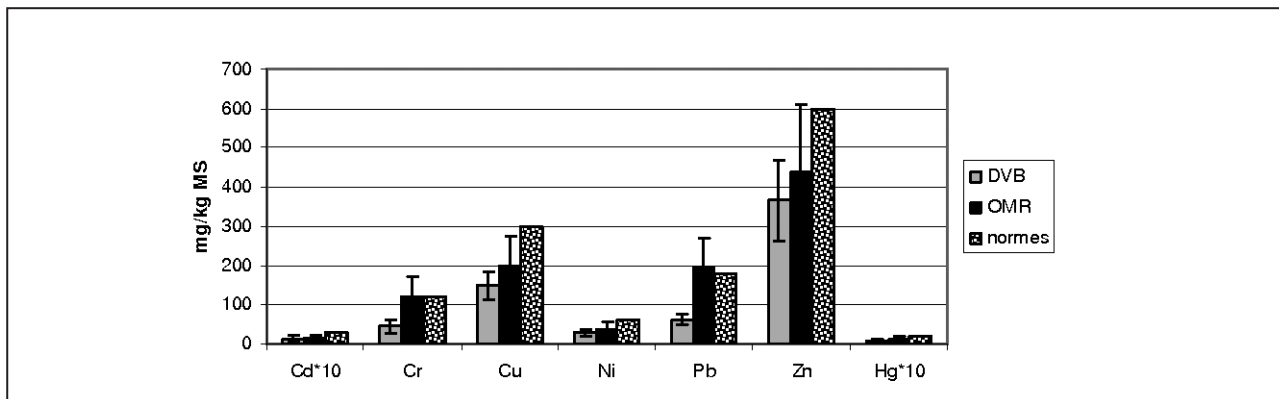
Pour les ETM et les CTO, elle est basée sur des étapes reposant sur les mêmes principes : caractérisation de la charge totale de polluants (cf. point 2.4.) et localisation de ces polluants dans les fractions granulométriques de composts et de sols. En outre, pour les ETM, l'application d'un protocole d'extraction permet de définir des compartiments de disponibilité potentielle différente (spéciation « chimique »).

## Fractionnement granulo-densimétrique des composts et sols

Les sols du prélèvement T<sub>1</sub> (2 mois après épandage) sont fractionnés selon la méthode développée par Balesdent (1996). La méthode utilisée pour les composts épandus en 2004 en est dérivée ; le fractionnement granulo-densimétrique est réalisé sur des composts préalablement tamisés à 5 mm. Des échantillons de 50 g de compost tamisé sont agités par retournement pendant 16 heures dans 300 ml d'eau osmosée avec 20 billes

**Figure 2:** Moyenne (Ecart-type) des teneurs en éléments traces dans les composts épandus depuis le début de l'expérimentation (1998 à 2006); concentrations maximales définies dans les normes NFU 44 095 et 44 051 définissant les critères d'innocuité pour les composts de boues et les autres composts respectivement.

**Figure 2:** Mean (SD) of trace element concentrations in the composts applied since the beginning of the experiment (1998 to 2006); maximum concentrations allowed in the standard NFU 44095 and 44051 corresponding to sludge compost and other composts, respectively.



de verre puis tamisés à 2 mm, 200  $\mu$ m et 50  $\mu$ m sous eau. Afin de détruire tous les agrégats résiduels, les fractions obtenues (2-5 mm, 200  $\mu$ m-2 mm et 50-200  $\mu$ m) sont à nouveau agitées dans 200 ml d'eau osmosée avec 10 billes de verre pendant 16 heures et tamisées. Les fractions granulométriques sont ensuite rassemblées par taille. Les fractions légère et dense > 50  $\mu$ m sont ensuite séparées par flottation dans l'eau. Afin d'obtenir suffisamment de masse pour analyse, les fractions légères sont rassemblées ainsi que les fractions denses. Au total, 3 fractions grossières sont isolées: [ $> 5$  mm], [50  $\mu$ m -5 mm]<sub>L</sub>, [50  $\mu$ m -5 mm]<sub>M</sub> et sont séchées à 40 °C et broyées pour analyse. La fraction [0-50  $\mu$ m] est récupérée par centrifugation (13261 g pendant 10 minutes) dans un volume final inférieur à 1 l puis lyophilisée et broyée avant analyse. Les mêmes analyses que celles effectuées sur les sols et les composts totaux sont réalisées par le laboratoire d'Arras.

### Spéciation des ETM dans les sols

L'analyse des teneurs totales en ETM est complétée par la mesure de la fraction « mobilisable » définie de manière normalisée (extraction EDTA « BCR »; Quevauviller, 1998), et d'une fraction très disponible (extraction dans une solution de nitrate de calcium). L'extraction par une solution d'EDTA 0,05 m à pH 7 (rapport masse: volume de 1:10; agitation pendant une heure, puis centrifugation et filtration), préconisée par l'ancien Bureau Communautaire de Références de l'UE, mobilise par son pouvoir complexant pratiquement tous les métaux présents en surface des constituants des sols et dans les phases les plus solubles comme les carbonates. Nous parlerons des ETM mobilisables. L'extraction dans une solution saline diluée non tamponnée concerne les métaux échangeables, retenus

principalement par leur charge. Nous avons utilisé le nitrate de calcium ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  0,05 m ; rapport masse: volume de 1:10; agitation pendant 18 heures, puis centrifugation et filtration).

## RÉSULTATS

### Qualité des composts apportés

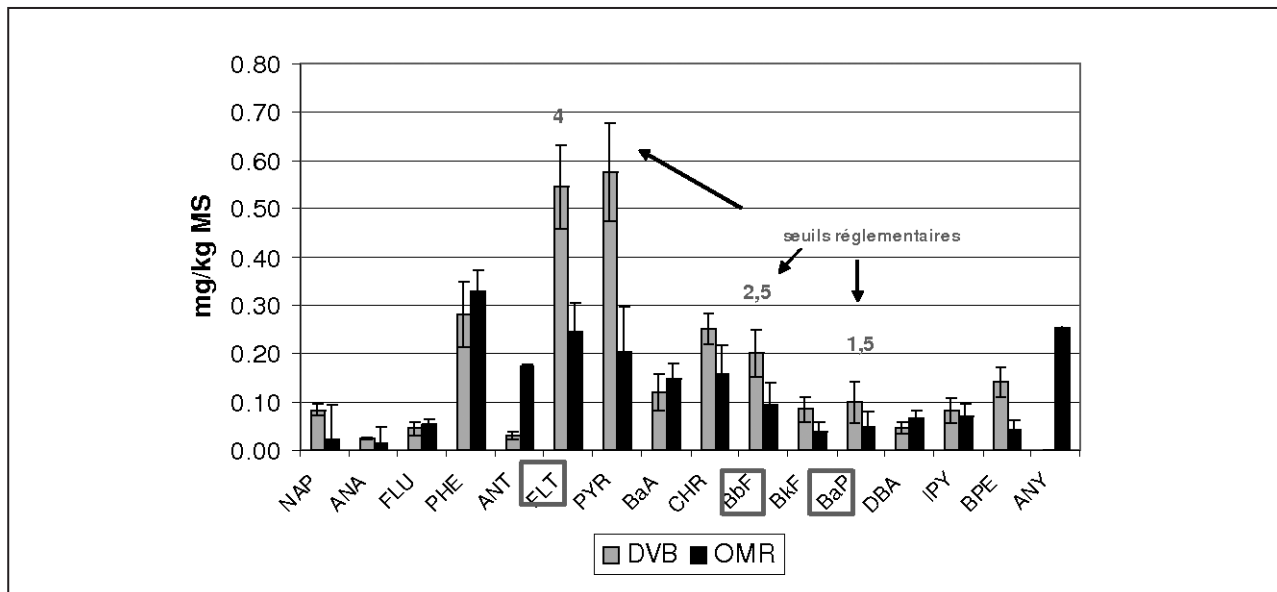
Cinq applications de compost ont eu lieu en 1998, 2000, 2002, 2004 et 2006. Les composts DVB et OMR diffèrent par leurs caractéristiques physico-chimiques (tableau 2). Les composts de boues sont plus riches en azote, phosphore et en potassium, en raison de la présence des boues. Bien qu'en moyenne les composts OMR aient des teneurs en carbonates supérieures, le pH des composts de boues est plus élevé. Les teneurs en Mg et en Na sont plus élevées dans les composts d'OMR.

Les teneurs en ETM sont toujours supérieures dans les composts d'OMR où la moyenne des analyses dépasse les teneurs réglementaires en vigueur depuis 2007 pour le Cr et le Pb (figure 2).

Les composts OMR ont une biodégradabilité supérieure à celle des composts de DVB avec en moyenne 40 et 10 % du C des composts minéralisé lors d'incubations en conditions contrôlées dans un sol, respectivement pour OMR et DVB (Annabi *et al.*, 2007). Cela s'explique par la composition biochimique différente des composts, les composts OMR étant plus riches en cellulose et les DVB plus riches en lignine. En conséquence, les composts DVB ont un indice de stabilité biologique (ISB, représentant la proportion de MO stable susceptible d'alimenter les stocks de

**Figure 3:** Concentrations moyennes en HAP des 5 composts DVB et OMR épanchés depuis le départ de l'expérimentation entre 1998 et 2006. Les concentrations maximales réglementaires en fluoranthène (FLT), Benzo(b)Fluoranthène (BbF) et benzo(a)Pyrène (BbP) sont indiquées.

**Figure 3:** Average concentrations in PAH in the 5 composts DVB and OMR applied since the beginning of the experiment (1998 to 2006). The maximum concentrations allowed in fluoranthene (FLT), Benzo(b)Fluoranthene (BbF) and benzo(a)Pyrene (BbP) are indicated.



MO du sol) de 0.54 très variable (ET: 0.26), les composts OMR ont un ISB moyen de 0.35 (ET 0.03) beaucoup moins variable d'un compost à l'autre.

Les composts DVB et OMR ont des teneurs en HAP similaires à celles rencontrées dans des composts de même type (Brandl *et al.*, 2005; Brochier *et al.*, 2008). Les concentrations en FLT, B(b)F et B(a)P sont largement inférieures aux concentrations maximales réglementaires (figure 3).

### Localisation des ETM et HAP dans les fractions granulométriques de composts

Les 3 répétitions du fractionnement granulo-densimétrique des composts épanchés en 2004 donnent des résultats reproductibles en terme de masses récupérées dans chacune des fractions (coefficient de variation variant de 2 à 13 %) et de caractéristiques analytiques des fractions (tableaux 3 et 4).

La fraction  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_M$  est prédominante dans le compost OMR et représente 37 % de la masse totale du compost. Puis l'importance des fractions dans la masse du compost OMR décroît dans l'ordre  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_M > [50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_L > [>5 \text{mm}] > [<50 \mu\text{m}]$ . Dans le compost DVB, c'est la fraction  $> 5 \text{mm}$  qui est la plus importante (37 % de la masse du compost) suivie par la fraction  $< 50 \mu\text{m}$  (32 % de la masse du compost). La fraction  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_M$  est faible (8 % de la masse du compost). Cependant, il faut noter que la fraction  $> 5 \text{mm}$  a

été séparée à sec et qu'elle est probablement fortement chargée de fractions fines qui adhèrent aux éléments grossiers de cette fraction.

On note l'enrichissement attendu en C organique et N de la fraction  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_L$  par rapport à la fraction  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_M$  et par rapport au compost total dans le compost OMR (tableau 3). La fraction  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_M$  concentre au contraire des éléments minéraux (Ca, Na, résultats non montrés) et certains métaux comme Cr, ce que l'on peut attribuer à la richesse en certains minéraux incluant des verres. Mais la fraction fine ( $< 50 \mu\text{m}$ ) est également riche en C, N et en éléments caractéristiques de minéraux fins (Mg, K, Al, Fe, résultats non montrés). La fraction  $> 5 \text{mm}$  présente des teneurs assez élevées en C, Cu, Cr et Ni. Une analyse qualitative des relations entre éléments majeurs et ETM permet d'associer, du point de vue de leur localisation dans les fractions:

- C, N, et dans une moindre mesure Cd dans la fraction  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_L$ ,
- Cr, Pb dans la fraction  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_M$ ,
- Cu, Zn, et dans une moindre mesure Ni dans les fractions  $< 50 \mu\text{m}$  et  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_L$ .

Les HAP sont concentrés dans la fraction  $< 50 \mu\text{m}$  et la fraction  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_L$  du compost OMR (tableau 5), et sont souvent inférieurs à la limite de quantification dans la fraction minérale  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_M$ . Seul le phénanthrène est plus concentré dans la fraction organique  $[50 \mu\text{m} - 5 \text{mm}]_L$  que dans la fraction  $< 50 \mu\text{m}$ .

**Tableau 2:** Moyenne (Ecart-type) des caractéristiques physico-chimiques des composts épandus depuis le début de l'expérimentation (1998 à 2006).

**Table 2:** Mean (SD) of physico-chemical characteristics of the composts applied in the field since the beginning of the experiment (1998 to 2006).

	pH	MO	C	N	C/N	CaCO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Olsen	K	Ca	Mg	Na
	eau	% MS	(g kgMS <sup>-1</sup> )			(g kg MS <sup>-1</sup> )						
DVB	7,7	47	274	22,8	12,1	20,9	26,1	1,8	15,2	32,3	4,6	3,8
	(0,9)	(6)	(61)	(4,2)	(2,9)	(11,5)	(8,6)	(0,7)	(6,0)	(7,6)	(0,6)	(2,5)
OMR	7,4	56	310	18,5	15,7	62,1	7,3	0,5	9,1	60,9	11,1	17,9
	(0,5)	(12)	(50)	(2,2)	(0,8)	(11,8)	(1,3)	(0,4)	(1,4)	(3,0)	(3,9)	(9,4)

Les matières organiques particulaires [50 µm -5 mm]<sub>L</sub> (MOP) du compost OMR présentent donc seulement un enrichissement en Cu, Zn et Ni et dans une moindre part en HAP par rapport au compost total mais pas par rapport aux particules fines (<50 µm), cet enrichissement étant peu marqué. La fraction [50 µm -5 mm]<sub>M</sub> concentre des éléments comme Pb et Cr.

Dans le cas du compost DVB, on retrouve un enrichissement en C et N dans la fraction [50 µm -5 mm]<sub>L</sub> par rapport au compost total mais également par rapport à la fraction fine < 50 µm (tableau 4). Parmi les ETM, le Cu présente une distribution similaire avec une concentration plus forte dans les MOP que dans le compost total et dans les fractions fines < 50 µm. En revanche, pour les autres ETM, leur concentration est similaire voire inférieure dans les fractions [50 µm -5 mm]<sub>L</sub> par rapport à la fraction < 50 µm. On retrouve une concentration en Cr plus importante dans la fraction [50 µm -5 mm]<sub>M</sub> et dans la fraction fine < 50 µm.

Dans le compost DVB, les fractions MOP [50 µm -5 mm]<sub>L</sub> et fines < 50 µm présentent des concentrations en HAP supérieures à celles du compost total; la concentration en HAP est beaucoup plus faible dans la fraction [50 µm -5 mm]<sub>M</sub>.

La contribution de chaque fraction pour un élément est calculée en multipliant les teneurs de chaque fraction en cet élément par le pourcentage massique qu'elle représente. Nous avons retenu les pourcentages massiques exprimés par rapport à la somme des fractions effectivement pesées (donc bouclant à 100 %), car les pertes inévitables au cours de la manipulation apparaissent réparties sur toutes les fractions. Ces contributions des fractions sont présentées dans les tableaux 3 et 4. La somme de ces fractions est enfin comparée aux résultats d'analyses des composts totaux épandus en 2004. Les écarts relatifs sont généralement faibles pour le compost OMR, avec quelques exceptions pour N (pertes de formes minérales?) et Cd, qui est en faible concentration et relativement soluble. Un autre écart inexpliqué concerne Pb, plus abondant par le bilan des fractions

que dans les échantillons totaux analysés (+33 %). Moyennant ces questionnements, il apparaît que la majeure partie de Cd, Cu, Ni et Zn se trouve dans la fraction légère [50 µm -5 mm]<sub>L</sub> (entre 30 et 36 %), ainsi bien sûr que la majeure partie de C et N. La fraction minérale grossière concentre la majeure partie de Cr et Pb (plus de 60 %), mais aussi 35 % du Cd. On voit aussi l'importance relative, pour certains éléments, des fractions < 50 µm et > 5 mm.

Les mêmes calculs ont été faits pour les fractions du compost DVB; davantage d'écarts importants au niveau des bilans sont observés (tableau 4). Une difficulté provient sans doute de ce qui est aussi un résultat remarquable: la fraction > 5 mm, nettement plus abondante que pour le compost d'OMR, apparaît contenir une partie importante de nombreux éléments, et même la majeure partie du C organique, du Cr et Ni. Or cette fraction n'a été analysée qu'en une répétition. Cette fraction tamisée à sec contient sans doute beaucoup de fractions fines agrégées aux débris végétaux grossiers.

Une forte proportion des HAP est dans les fractions organiques particulaires [50 µm -5 mm]<sub>L</sub> respectivement 46 et 34 % pour les composts OMR et DVB (tableau 5). La fraction fine < 50 µm représente également 24 et 34 % des HAP totaux pour ces 2 composts. Dans le compost DVB, la présence de particules de boue dans la fraction fine explique sans doute la forte teneur en HAP de cette fraction. Comme pour les ETM, le bilan de distribution des HAP correspond à la teneur totale en HAP mesurée sur le compost non fractionné pour OMR. En revanche, le bilan est excédentaire pour le compost DVB (+ 0,27 mg/kg) sans doute en raison de la présence de particules fines de boue dans la fraction grossière tamisée à sec.

## Flux d'éléments générés par les épandages

Les doses de composts à épandre sont calculées de façon à apporter 4 t C par hectare à chaque épandage. Les doses effectivement épandues sont mesurées et ont généré des flux



**Tableau 3:** Fractionnement granulo-densimétrique du compost OMR épandu en 2004. Distribution massique des différentes fractions, caractéristiques physico-chimiques des fractions, distribution des éléments dans les différentes fractions (en % du total des éléments retrouvés dans la somme des fractions), bilan des éléments retrouvés dans les différentes fractions et comparaison avec les concentrations mesurées directement dans le compost total. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux écart-types des mesures.

**Table 3:** Particle-size fractionation of the compost OMR spread in 2004. Mass distribution within the fractions, physico-chemical characteristics of the fractions (in % of total elements found in the fractions), mass balance of the elements found in the fractions and comparison with the concentrations directly measured in total composts. Values in parenthesis correspond to SD).

OMR	Masse %	C g kg <sup>-1</sup>	N g kg <sup>-1</sup>	C/N	Cd mg kg <sup>-1</sup>	Cr mg kg <sup>-1</sup>	Cu mg kg <sup>-1</sup>	Ni mg kg <sup>-1</sup>	Pb mg kg <sup>-1</sup>	Zn mg kg <sup>-1</sup>
> 5 mm	19,4	356	16,4	21,8	1,1	91,5	94	32	111	283
[0,05-5 mm]M	37,2	28 (5)	2,49 (0,15)	11,2	1,2 (0,4)	284 (14)	57,6 (6,3)	19,8 (2,8)	447 (125)	261 (57)
[0,05-5 mm]L	29,9	437 (4)	23,5 (0,5)	18,6	1,54 (0,03)	41 (2)	125 (10)	25,8 (2,1)	145 (6)	429 (17)
[0-50 µm]	13,6	256 (1)	20,9 (0,1)	12,3	1,35 (0,18)	88 (1)	178 (1,8)	36 (2,5)	278 (8)	540 (16)
compost total (teneurs mesurées)		263 (9)	16,8 (1,2)	15,7	1,8 (0,4)	129 (12)	95 (3)	25,2 (4)	202 (22)	346 (11)
<b>Contributions des fractions aux teneurs totales</b>										
> 5 mm		28 %	23 %		16 %	12 %	18 %	24%	8%	15%
[0,05-5 mm]M		4 %	7 %		35 %	72 %	21 %	28 %	62 %	27 %
[0,05-5 mm]L		53%	50%		35%	8%	37%	30%	16%	36%
[0-50 µm]		14%	20%		14%	8%	24%	19%	14%	21%
Compost total (teneurs calculées à partir des fractions)		245	14		1,3	148	101	26,2	269	354

de matières et d'éléments résumés dans les *tableaux 6 et 7*. Les apports de N, P et K par les épandages sont plus élevés avec les composts DVB qu'avec les composts OMR. Ainsi, les flux d'azote sont en moyenne de 366 kg N/ha et 239 kg N/ha, respectivement pour chaque épandage de compost DVB et OMR. En revanche, les composts OMR génèrent des flux de Ca, Mg et Na supérieurs à ceux du DVB. Ces flux d'éléments majeurs expliquent la valeur fertilisante de ces composts. Ils doivent être pris en compte dans le calcul des doses à apporter, en particulier pour les flux de N et de P dans le cadre du raisonnement de la fertilisation.

Les flux d'ETM sont conformes à la réglementation pour les DVB, à l'exception des flux de Cu. Pour les composts OMR, les flux d'ETM dépassent les flux réglementaires en vigueur depuis 2007 (norme NFU 44051) pour Cr, Cu et Pb. A chaque épandage, les flux d'ETM représentent 0,5 à 6 % des stocks présents

initialement dans l'horizon de surface du sol de l'essai (*figure 4*). Les flux maxima autorisés par la réglementation représentent des proportions similaires ou supérieures sauf dans le cas du Cu et du Pb pour lesquels ces proportions restent supérieures dans le cas du compost OMR.

Enfin, les flux des 3 HAP réglementaires cumulés sur 10 ans d'épandage sont inférieurs aux flux maxima prévus dans la norme NFU 44-095: respectivement 40, 15 et 8 g/ha pour FLT, BbF et BaP dans le cas du compost DVB et 20, 6 et 3 g/ha pour OMR quand les flux maxima réglementaires sont de 60, 40 et 30 g/ha. Les flux totaux en 16 HAP sur 10 ans sont de 200 et 140 g/ha pour DVB et OMR; les flux moyens par épandage représentent 1 à 4 % des stocks initiaux dans le sol.

**Tableau 4:** Fractionnement granulo-densimétrique du compost DVB épandu en 2004. Distribution massique des différentes fractions, caractéristiques physico-chimiques des fractions, distribution des éléments dans les différentes fractions (en % du total des éléments retrouvés dans la somme des fractions), bilan des éléments retrouvés dans les différentes fractions et comparaison avec les concentrations mesurées directement dans le compost total. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux écart-types des mesures.

**Table 4:** Particle-size fractionation of the compost DVB spread in 2004. Mass distribution within the fractions, physico-chemical characteristics of the fractions (in % of total elements found in the fractions), mass balance of the elements found in the fractions and comparison with the concentrations directly measured in total composts. Values in parenthesis correspond to SD).

DVB	Masse	C	N	C/N	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	%	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
> 5 mm	36,7	374	16,6	22,5	0,5	197	111	55,1	35,7	248
[0,05-5 mm]M	7,8	35	3,8	14,5	<0,5	72,7	60	32,9	40,9	219
		(1)	(0,19)			(13,1)	(1)	(1)	(3,3)	(2)
[0,05-5 mm]L	24	359	24,6	9,2	1,4	40,5	283	44,6	66,4	589
		(4)	(0,25)		(0,04)	(1,2)	(3)	0	0	(6)
[0-50 µm]	31,5	180	22,8	7,9	1,4	73,7	272	56,8	114	762
		(2)	(0,23)		(0,06)	(0,7)	(2,7)	(0,6)	(2,2)	(7,6)
compost total		311	21	14,8	0,9	37	167	33,7	51,6	415
(teneurs mesurées)		(22)	(0,4)		(0,1)	(4)	(13)	(3)	(4)	(44)
<b>Contributions des fractions aux teneurs totales</b>										
> 5 mm		48 %	31 %			65 %	20 %	39 %	19 %	19 %
[0,05-5 mm]M		1 %	2 %			5 %	2 %	5 %	5 %	3 %
[0,05-5 mm]L		30%	30%			9%	34%	21%	23%	29%
[0-50 µm]		20%	37%			21%	43%	35%	53%	49%
Compost total (teneurs calculées à partir des fractions)		283	19,5			111	199	51,4	68,7	490

**Tableau 5:** Bilan de la distribution des HAP totaux au sein des fractions granulo-densimétriques des composts épandus en 2004.

**Table 5:** Mass balance and distribution of PAH within the particle-size fractions of the composts spread in 2004.

	OMR		DVB	
	HAP	Distributions dans les fractions	HAP	Distributions dans les fractions
	mg kg <sup>-1</sup>	% total	mg kg <sup>-1</sup>	% total
> 5 mm	1,08	16,9	1,73	29,4
M 50 µm – 5 mm	0,41	12,4	0,57	2,08
M 50 µm – 5 mm	1,92	46,4	3,04	34
< 50 µm	2,21	24,2	2,35	34,5
Somme des contributions des fractions	1,24		2,14	
Concentration compost total	1,17		1,87	

**Tableau 6:** Flux moyen par hectare (Ecart-type) et par épandage, de matière sèche et d'éléments générés lors des 5 épandages de compost ayant déjà eu lieu.

**Table 6:** Average dry mass applied per ha at each compost spreading and corresponding average input of elements in soils.

	MS	Nmin	C	N orga	CaCO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Olsen	K	Ca	Mg	Na
	t/ha	kg/ha	t/ha					Kg/ha			
DVB	16.8	65	4.6	342	374	443	31	253	534	77	80
ET	3.5	23	1.4	48	241	178	16	130	146	19	38
OMR	12.7	24	3.9	223	827	95	6	117	771	146	201
ET	4,2	5	1.3	96	215	41	4	47	250	77	86

**Tableau 7:** Flux moyen en ETM par hectare et par épandage (Ecart-type) et flux sur 10 ans (correspondant aux 5 épandages). Les flux réglementaires maximum sur 10 ans sont reportés.

**Table 7:** Average input of HM per ha and for each application (SD) and total loading corresponding to 5 applications. Les maximum fluxes defined in the legislation are mentioned.

		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
		g ha <sup>-1</sup>						
DVB	Par épandage	19	698	2447	469	990	6018	15
ET		7	98	720	139	102	1950	4
DVB	10 ans	93	3490	12233	2343	4954	30092	74
OMR	Par épandage	21	1487	2505	456	2428	5903	16
ET		10	609	1158	231	953	4034	12
OMR	10 ans	104	7433	12526	2280	12144	29517	77
Max	10 ans	150	6000	10000	3000	9000	30000	100

## Evolution des caractéristiques physico-chimiques des sols

### Paramètres agronomiques

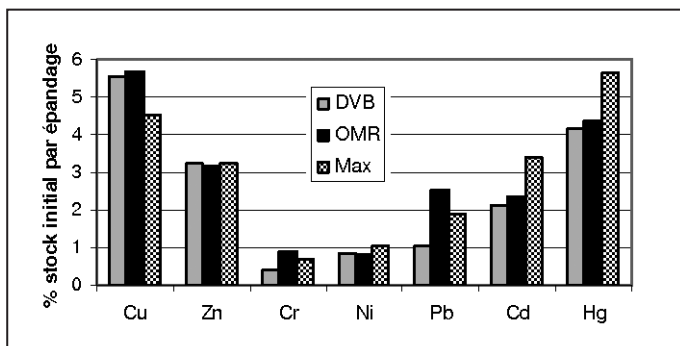
Les apports successifs ont modifié les caractéristiques physico-chimiques des sols (tableau 8). Ainsi, les teneurs en C organique ont augmenté significativement dans les parcelles recevant les composts DVB et de moindre façon dans les parcelles recevant le compost OMR. En revanche, les teneurs en C organique tendent à diminuer dans les 2 traitements témoins avec et sans N. Les teneurs en N augmentent moins que celles de C, ce qui se traduit par une augmentation du C/N dans tous les traitements. Le pH augmente significativement dans le traitement OMR et tend à diminuer dans les autres traitements.

### Teneurs en ETM et HAP totaux dans les sols

Les teneurs en Cu augmentent significativement dans les traitements avec apport de composts OMR et DVB. Les teneurs en Zn augmentent également mais de façon significative seulement dans le cas du traitement DVB (tableau 9). Les concentrations des autres ETM n'évoluent pas de façon significative sauf pour le Cd qui décroît dans certains traitements. Les concentrations en Cu et Hg sont significativement supérieures dans les traitements DVB et OMR par rapport au témoin en 2004 et 2006, celles en Zn ne le sont qu'en 2006 (figure 5). En revanche, les concentrations des autres ETM ne se différencient pas significativement. Les évolutions en ETM totaux dans les horizons de surface dans les différents traitements évoluent de façon cohérente par rapport aux flux d'ETM apportés par les composts. Les concentrations restent de l'ordre de grandeur des concentrations trouvées dans les sols cultivés de la région.

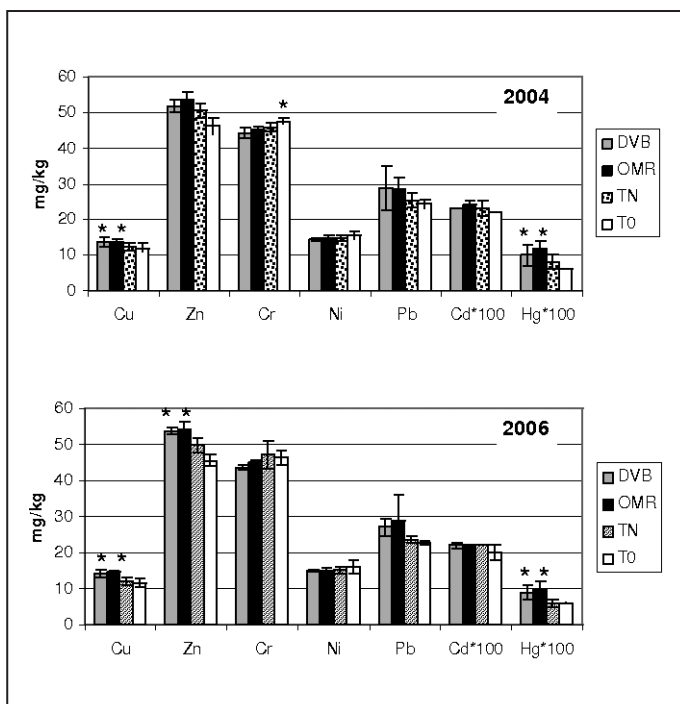
**Figure 4:** Proportions des stocks initiaux en ETM du sol de l'essai représentées par un épandage moyen de compost DVB et OMR; comparaison avec les proportions que représenterait un épandage de compost dont les concentrations en ETM correspondraient aux maxima de la norme 44-095.

**Figure 4:** Proportions of initial stocks of trace elements in the soil of the field experiment corresponding to one average spreading of compost DVB and OMR; comparison with the proportions corresponding to the maximum allowed application (NFU 44 095).



**Figure 5:** Teneurs en ETM dans les sols des 4 traitements suivis en 2004 et 2006 (moyenne des 4 parcelles de chaque traitement). Les valeurs marquées d'un astérisque sont différentes significativement au seuil de 5 %.

**Figure 5:** Trace elements concentrations in soils of the 4 treatments followed in the field experiment (average of 4 plots per treatment). The values labelled with an asterisk are significantly different at 5 % level).



Les teneurs en HAP totaux n'évoluent pas entre 1998 et 2006. Elles restent en moyenne autour de 300 µg/kg dans tous les traitements avec une très forte variabilité qui contribue à l'absence de toute différence significative entre traitements.

## Indicateurs d'exposition: localisation des micropolluants dans des fractions granulo-densimétriques de sol

Le fractionnement granulo-densimétrique par tamisage et flottation est appliqué aux échantillons moyens des horizons de surface des parcelles prélevés en octobre 2004 (T<sub>1</sub>), 2 mois après l'incorporation des composts. Les fractions fines < 50 µm représentent 92-93 %, les fractions [50 µm - 5 mm]<sub>M</sub> 5-6% et les fractions MOP [50 µm - 5 mm]<sub>L</sub> 1-1.5 % de la masse totale de sol. Les masses de fraction MOP sont significativement supérieures dans le traitement DVB par rapport aux 3 autres traitements.

Les teneurs en C dans la fraction MOP (150 à 210 g/kg) sont environ 20 fois supérieures à celle du sol total. Cette fraction organique grossière présente globalement des teneurs en ETM supérieures à celles du sol total (figure 6). Les teneurs en Cd sont 4 à 5 fois supérieures dans cette fraction MOP par rapport au sol total, les teneurs dans les autres fractions étant inférieures à la limite de quantification. L'apport des composts augmente significativement les concentrations en Cu, Zn, Pb, Ni et Cd dans cette fraction MOP. Les teneurs en ETM sont plus élevées dans la fraction [50 µm - 5 mm]<sub>M</sub> dans les sols recevant le compost OMR, avec une augmentation des concentrations particulièrement marquées pour Cr, Ni et Pb. On note toutefois la forte hétérogénéité des concentrations en ETM dans cette fraction.

Entre 5.9 et 10.5 % du Cu et du Cd total se trouvent dans la fraction organique [50 µm - 5 mm]<sub>L</sub>, avec un net effet du traitement: DVB > OMR > T. Nous avons vu que le compost DVB enrichit le sol en MOP, mais l'augmentation de leur contribution au métal total est surtout due aux teneurs en Cu et Cd plus élevées dans cette fraction MOP qui contient 2 à 3 % du Pb et Cr total, 2 à 4 % du Zn total, 3 à 4 % du Ni total. Dans tous les cas sauf pour Cr, les proportions sont légèrement supérieures dans les traitements recevant des composts.

La fraction minérale grossière [50 µm - 5 mm]<sub>M</sub> contribue aussi significativement au Cuivre total dans les parcelles OMR (7 %), plus que dans les parcelles Témoins ou DVB (2 à 3 %). Ce second effet du traitement est également net avec Pb (14 % du Pb total dans le traitement OMR pour 6 à 7 % dans les autres traitements), Cr (7 % dans le traitement OMR, 4 à 5 % dans les autres traitements), et l'est moins avec Zn et Ni (3 à 4 % dans tous les traitements).

**Tableau 8 :** Evolution des caractéristiques physico-chimiques dans l'horizon de surface des sols des traitements suivis après 3 et 4 épandages de composts (respectivement en 2004 et 2006). Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes (test de Newman-Keuls à  $\alpha = 5\%$ ).

**Table 8 :** Evolution of physico-chemical characteristics in the surface horizon of soil in the different treatments after 3 and 4 compost applications in 2004 and 2006, respectively (for each treatment and analysis, data followed by different letters are significantly different, Newman-Keuls test,  $\alpha = 5\%$ ).

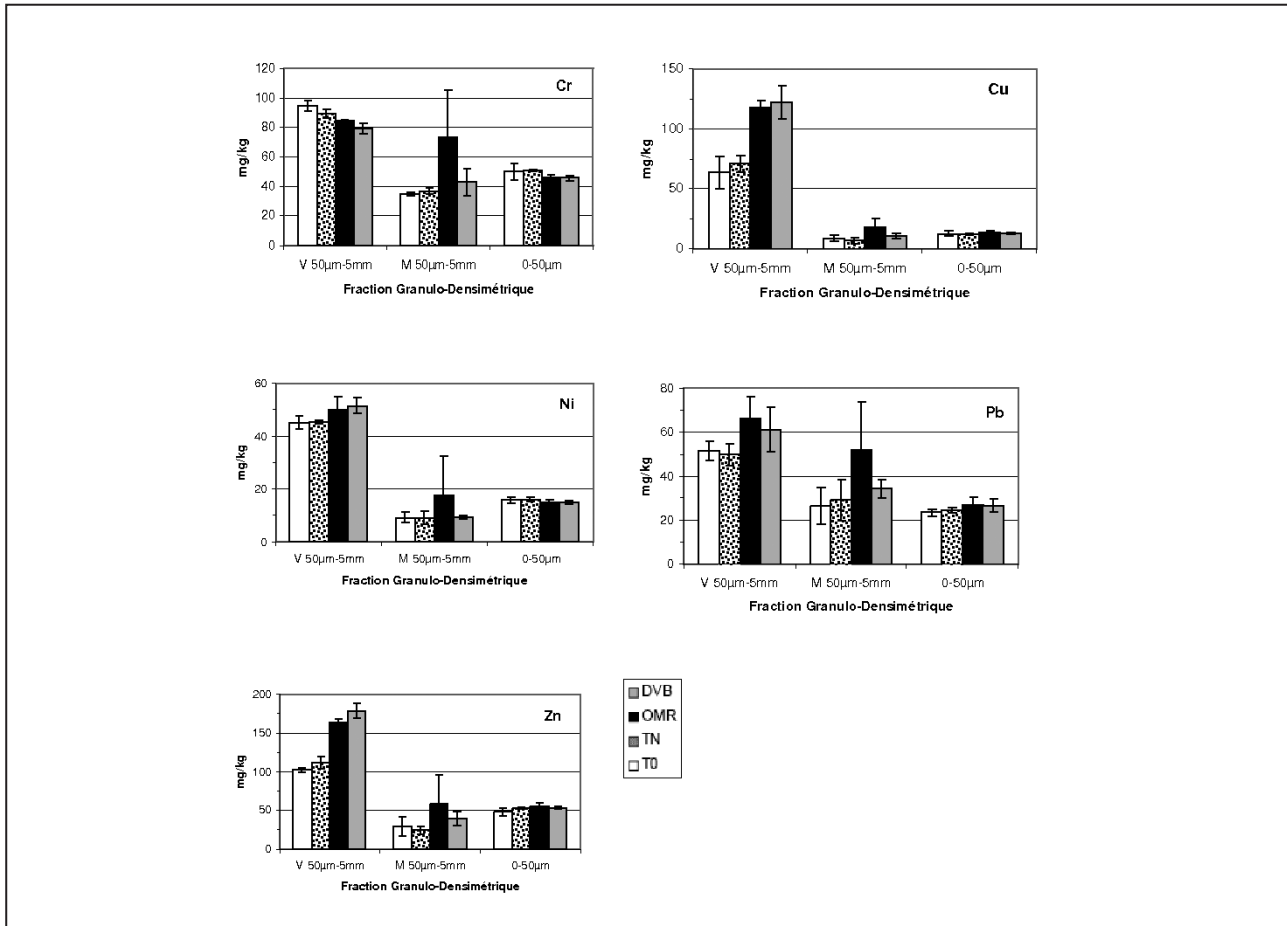
		<b>C</b>	<b>N</b>	<b>C/N</b>	<b>pH</b>
		g/kg <sup>-1</sup>			
<b>DVB</b>	1998	10,5 b	1,08 b	9,7	7,0
		1,0	0,05	0,6	0,2
	2004	12,1 ab	1,14 ab	10,6	6,8
		0,8	0,07	0,4	0,1
	2006	12,4 a	1,22 a	10,2	6,8
		1,1	0,08	0,4	0,2
<b>OMR</b>	1998	10,3	1,09	9,5	7,0 b
		0,7	0,05	0,6	0,2
	2004	11,2	1,09	10,3	7,4 a
		0,7	0,05	0,4	0,1
	2006	11,3	1,12	10,1	7,4 a
		0,8	0,06	0,3	0,2
<b>TN</b>	1998	10,6	1,13	9,3	7,1
		0,2	0,04	0,2	0,1
	2004	10,3	1,01	10,2	6,9
		0,2	0,02	0,2	0,2
	2006	9,8	1,01	9,7	6,9
		0,8	0,04	0,5	0,3
<b>TO</b>	1998	10,3 a	1,11 a	9,3	6,8 a
		0,7	0,08	0,1	0,2
	2004	9,6 b	0,95 b	10,1	6,8 a
		0,4	0,05	0,2	0,2
	2006	9,0 b	0,95 b	9,5	6,7 b
		0,7	0,05	0,6	0,1

Les MOP présentent également des teneurs 5 à 10 fois plus élevées en HAP que les fractions minérales et les fractions fines < 50  $\mu\text{m}$  (résultats non montrés); les teneurs du sol total sont voisines de celles des fractions fines. Mais on observe une grande variabilité des teneurs des fractions entre parcelles d'un même traitement, comparable avec l'hétérogénéité initiale des teneurs en HAP totaux observée entre les blocs de l'essai

au démarrage (données 1998). En terme de compartiment, la majeure partie des HAP se trouve dans la fraction fine < 50  $\mu\text{m}$ . La contribution des MOP est cependant non négligeable et plus importante dans les parcelles DVB (12 à 19 %) que dans les parcelles OMR (6 à 13 %) et Témoin (3 à 11 %).

**Figure 6:** Concentrations en ETM dans les fractions granulo-densimétriques des sols prélevés en Octobre 2004 (T1). Moyenne de 3 parcelles par traitement.

**Figure 6:** Concentrations in trace elements in particle-size fractions of soils sampled in october 2004 (T1). Average of 3 plots per treatment.



## Indicateurs d'exposition: spéciation des ETM dans les sols

### Evolution temporelle des métaux extractibles à l'EDTA

Ces analyses sont réalisées lors des prélèvements de sol avant chaque épandage depuis 2002 (*tableau 10*). Des analyses supplémentaires ont été effectuées sur les échantillons prélevés aux temps T<sub>1</sub> (oct. 2004) et T<sub>3</sub> (juin 2005) (*figure 7*). Les fractions extractibles à l'EDTA représentent environ 0.2 % du Cr total, 10 % du Ni et Zn totaux, 25 % du Pb total et 50 % du Cu et Cd totaux.

Dès 2002, on met en évidence une différenciation du Zn mobilisable entre témoins et parcelles recevant des composts, plus marquée que pour le zinc total. Les niveaux moyens de Cr, Cu et Pb extractibles à l'EDTA augmentent également en cas

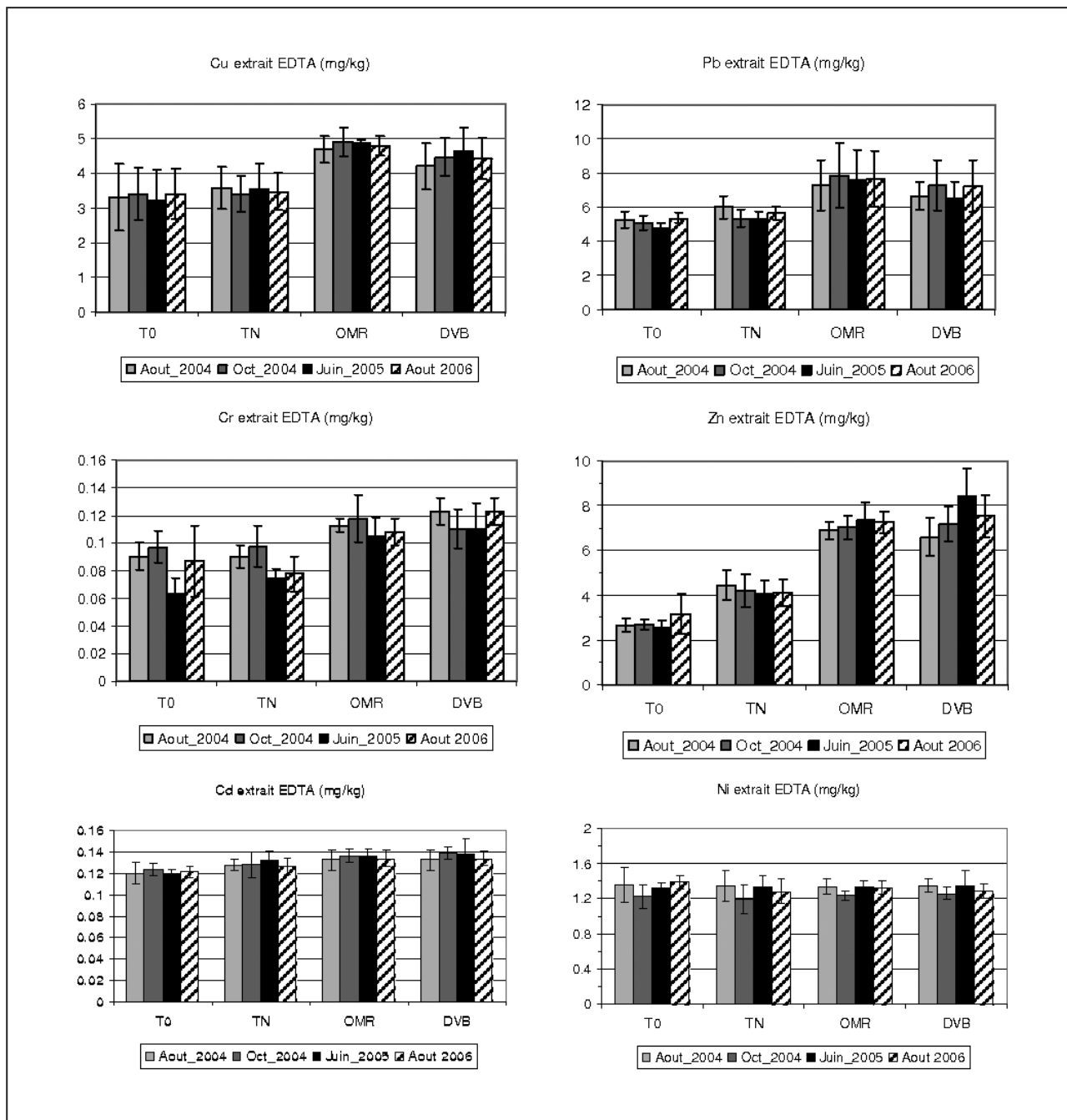
d'apport de composts par rapport aux témoins sans différence entre les composts (différences non significatives dans le cas du Pb). Ces différences sont plus marquées que pour les ETM totaux. Entre T<sub>0</sub> (août 2004) et T<sub>1</sub> (octobre 2004), un épandage a eu lieu dans les parcelles OMR et DVB qui n'entraîne pas d'augmentation significative du Zn extractible à l'EDTA; en revanche une différence significative au seuil de 5 % est observée pour les parcelles DVB entre août 2004 et juin 2005 (T<sub>3</sub>). Les autres résultats d'ETM extractibles à l'EDTA ne montrent aucune évolution significative entre les 2 épandages.

### Métaux échangeables par le nitrate de calcium (prélèvement T1)

Les résultats sont présentés dans la *figure 8*. Les quantités de Zn, Cu et Cd échangeables représentent respectivement 0.4, 1 et 0.02 % des ETM totaux. Le pH des extraits a été mesuré. Il est de  $5.17 \pm 0.60$  dans le traitement T0,  $6.15 \pm 0.11$  dans le

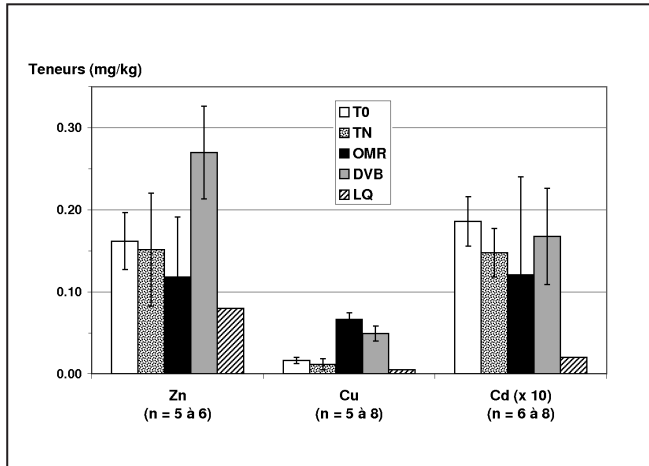
**Figure 7:** Evolution des concentrations en ETM « mobilisable » (extractibles à l'EDTA) dans les horizons de surface (moyennes et écarts-types; n = 4 parcelles pour TN, OMR, DVB; n=3 pour la modalité T0).

**Figure 7:** Evolution of concentrations of potentially available trace elements (extractable with EDTA) in the upper horizons of soils (average and SD, n = 4 plots for all treatments except T0, n = 3).



**Figure 8 :** Concentrations en ETM extraits au  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  dans les traitements TN, T0, OMR et DVB (moyennes et écarts-types, n variable ; comparaisons avec les limites de quantification LQ).

**Figure 8 :** Concentration in « soluble » trace elements extractable with  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  in the 4 treatments (mean and SD, variable n, comparison with quantification limits LQ).



traitement TN,  $6.66 \pm 0.26$  dans le traitement OMR et  $6.13 \pm 0.26$  dans le traitement DVB.

Les apports de composts DVB et OMR augmentent le Cu échangeable d'un facteur 4 environ par rapport aux traitements témoins. L'apport de compost DVB augmente également le Zn échangeable d'un facteur 1.7 par rapport aux témoins. L'absence d'effet des apports du compost OMR sur le Zn échangeable, au contraire de Cu, est probablement due aux effets antagonistes d'augmentation du pH et de l'apport de métaux labiles par ce type de compost. La solubilité de Zn, majoritairement sous forme cationique dans les solutions de sols, est plus sensible au pH que celle de Cu, majoritairement sous forme complexée. Il n'y a pas d'effet significatif des composts sur le Cd échangeable.

## DISCUSSION ET CONCLUSION

### Effets des apports répétés de composts sur les caractéristiques physico-chimiques des sols

Le dispositif Qualiagro a été mis en place en 1998 afin d'évaluer les effets d'apports répétés de composts d'origine urbaine sur la qualité du sol mais également des plantes cultivés sur le dispositif. Entre 1998 et 2006, 5 épandages ont eu lieu correspondant à 16,8 t MS/ha pour le compost DVB et 12,7 t MS/ha pour le compost OMR en moyenne à chaque épandage. Ces doses sont supérieures aux

doses classiquement épandues (10 t MS/ha environ). Ces épandages ont modifié les caractéristiques physico-chimiques du sol. Les teneurs en C et N organique ont augmenté dans les 2 traitements recevant des composts, de façon significative pour le compost DVB. Les apports de compost OMR augmentent significativement le pH du sol. Ces effets sont liés aux caractéristiques différentes des composts: matière organique plus stabilisée dans le cas du compost DVB, teneurs en carbonates pour les composts OMR. Par ailleurs, les apports de composts contribuent à l'augmentation des rendements (résultats non montrés) par rapport aux traitements témoins y compris le traitement témoin recevant une fertilisation minérale. Ils améliorent également la stabilité de la structure du sol (Annabi *et al.*, 2007). Ces effets positifs des apports de composts sur la fertilité du sol sont largement documentés (Houot, 2005).

Les composts apportés présentent des concentrations moyennes en ETM et CTO conformes à la réglementation en vigueur depuis 2004 et 2007, mis à part les concentrations en Pb et Cr pour le compost OMR. Les composts OMR sont issus du compostage de la fraction résiduelle des ordures ménagères après séparation à la source des emballages propres et secs. La qualité de ces composts dépend de l'efficacité de la collecte séparée des déchets dangereux diffus grâce à la mise en place de déchetterie et de points de collecte spécifiques de ces déchets. Cette qualité des composts OMR s'est beaucoup améliorée récemment (Kalassi *et al.*, 2008). Cependant, on constate ici que malgré des concentrations en ETM conformes à la réglementation, les flux apportés en ETM sont supérieurs aux flux maximum réglementaires pour Cr, Cu et Pb dans le cas du compost OMR et Cu et Zn dans le cas du compost DVB. Ces flux d'ETM ont pour conséquence une augmentation significative des teneurs totales en Cu et Zn dans les sols depuis le départ de l'essai. Ces augmentations sont cohérentes avec les flux d'entrée en Cu et Zn liés aux épandages. Les flux exportés par les plantes sont mesurés par ailleurs et sont très faibles (< 1 % des apports sauf pour Cu, 2 % et Zn 4 %). Aucune évolution significative des teneurs en ETM dans les grains récoltés n'est observée par ailleurs (Schaub *et al.*, 2007). Pour les autres ETM, les flux apportés n'entraînent pas de modification significative des concentrations dans le sol car on reste dans la variabilité de la mesure initiale. L'absence d'effets des apports de composts ou boues conformes aux critères réglementaires est classiquement rapportée (Pinet *et al.*, 2003). Cependant, le bilan des entrées et sorties des ETM dans un agrosystème soumis à épandages permet de simuler l'évolution des teneurs en ETM dans les sols (Lamy *et al.*, 2005). Il est à noter que les flux en Cu, Zn et Pb sont proches, voire dépassent les flux maximum également dans le traitement fumier (résultats non montrés). Dans notre situation, les flux d'entrée d'ETM seraient plus faibles avec des doses d'apport correspondant à ce qui est plus classiquement apporté (10 t MS au lieu de 13 ou 17 tMS/ha).

Les teneurs initiales en HAP correspondent à des teneurs rencontrées dans des sols agricoles (Brochier *et al.*, 2008).



**Tableau 9:** Evolution of physico-chemical characteristics in the surface horizon of soil in the different treatments after 3 and 4 compost applications in 2004 and 2006, respectively (for each treatment and analysis, data followed by different letters are significantly different, Newman-Keuls test,  $\alpha = 5\%$ ).

**Table 9:** Evolution des concentrations totales en ETM dans les horizons de surface des traitements suivis après 3 et 4 épandages de composts (respectivement en 2004 et 2006). Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes (test de Newman-Keuls à  $\alpha = 5\%$ ).

		Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	Hg
		mg/kg <sup>-1</sup>						
<b>DVB</b>	1998	11,6 a	51,0 a	44,2	14,4	36,9	0,24	0,098
		1,2	2,5	3,9	0,4	15,8	0,02	0,017
	2004	13,6 b	51,8 a	44,1	14,5	28,7	0,23	0,098
		1,2	1,8	1,4	0,4	6	0,004	0,028
	2006	14,4 c	53,7 b	43,6	15	27	0,22	0,09
		1,1	1	0,8	0,3	2,4	0,01	0,02
<b>OMR</b>	1998	11,6 a	52,5	46,2	14,4	24,9	0,23 a	0,098
		0,3	6	3,8	0,5	2,7	0,01	0,019
	2004	13,8 b	53,6	45,1	14,7	28,4	0,24 a	0,118
		0,4	2,1	0,8	0,6	3,3	0,01	0,021
	2006	14,5 c	54,3	45	15,1	29,1	0,22 b	0,1
		0,4	2,2	0,8	0,6	7	0	0,02
<b>TN</b>	1998	11,8	50,2	46	14,9 ab	23,4	0,24	0,093
		0,9	2,7	3	0,8	0,9	0,01	0,01
	2004	12,1	50,5	45,7	14,7 b	25,2	0,23	0,078
		1,1	2,1	1,3	0,8	2	0,02	0,024
	2006	12,1	49,9	47,2	15,3 a	23,6	0,22	0,06
		1	1,9	3,9	0,9	0,9	0	0,01
<b>TO</b>	1998	11,4	47,6	47,1	15,8	22,9	0,24 a	0,085
		1,3	2,4	2,2	1,1	1,4	0,01	0,013
	2004	11,9	46,3	47,5	15,5	24,3	0,22 ab	0,06
		1,4	2,3	0,9	1,1	1,2	0,004	0,001
	2006	11,6	45,5	46,3	16,2	22,7	0,20 b	0,06
		1,1	1,6	2	1,8	0,6	0,02	0

Elles sont très hétérogènes. Les composts apportés ont des concentrations faibles en HAP, largement inférieures aux maxima réglementaires. Aucune évolution significative des concentrations dans les sols n'est observée.

**Tableau 10:** Evolution des concentrations en ETM extractibles à l'EDTA BCR dans les sols. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes (test de Newman-Keuls à  $\alpha = 5 \%$ ).

**Table 10:** Evolution of concentrations of EDTA BCR-extractable HM in the surface horizon of soil (for each year and HM, data followed by different letters are significantly different, Newman-Keuls test,  $\alpha = 5 \%$ )

	Cr	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
mg kg <sup>-1</sup>						
<b>2002</b>						
<b>DVB</b>	0,10 (0,02)	0,13 (0,01)	4,00 (0,96) ab	1,80 (0,10)	6,65 (0,93)	5,90 (1,60)a
<b>OMR</b>	0,11 (0,01)	0,13 (0,01)	4,53 (0,33) b	1,10 (0,80)	7,45 (1,70)	6,73 (0,56)a
<b>TN</b>	0,08 (0,01)	0,12 (0,00)	3,63 (0,59) a	1,13 (0,17)	5,68 (0,25)	4,40 (0,69)a
<b>TO</b>	0,07 (0,02)	0,12 (0,01)	3,40 (0,80) a	1,18 (0,10)	5,53 (0,56)	2,83 (0,22)b
<b>2004</b>						
<b>DVB</b>	0,12 (0,01)	0,13 (0,01)	4,22 (0,67) ab	1,35 (0,70)	6,63 (0,81)	6,59 (0,86)a
<b>OMR</b>	0,11 (0,01)	0,13 (0,01)	4,70 (0,40) b	1,33 (0,80)	7,26 (1,48)	6,88 (0,41)a
<b>TN</b>	0,09 (0,01)	0,13 (0,01)	3,59 (0,61) b	1,35 (0,17)	5,99 (0,63)	4,46 (0,67)b
<b>TO</b>	0,09 (0,01)	0,12 (0,01)	3,27 (0,79) b	1,36 (0,16)	5,21 (0,38)	2,74 (0,30)b
<b>2006</b>						
<b>DVB</b>	0,12 (0,01) a	0,13 (0,01)	4,44 (0,60) a	1,29 (0,80)	7,20 (1,53)	7,53 (0,96)a
<b>OMR</b>	0,11 (0,01) a	0,13 (0,01)	4,80 (0,29) a	1,32 (0,80)	7,65 (1,62)	7,26 (0,49)a
<b>TN</b>	0,08 (0,01) b	0,13 (0,01)	3,48 (0,54) b	1,28 (0,14)	5,62 (0,36)	4,12 (0,61)b
<b>TO</b>	0,08 (0,02) b	0,12 (0,00)	3,24 (0,75) b	1,36 (0,09)	5,28 (0,27)	3,05 (0,77)b

## Indicateurs d'exposition aux ETM et HAP dans les composts et sols

Deux types d'indicateurs ont été mesurés: localisation dans des fractions granulo-densimétriques et spéciation des ETM sous des formes facilement extractibles. Les fractions grossières légères [50  $\mu\text{m}$ -5 mm]L sont abondantes dans les composts (20 à 30 %). Ces fractions sont enrichies en C organique par rapport aux composts totaux. Elles sont également enrichies en Cu, Ni, Pb et Zn par rapport au compost total dans le cas du compost DVB. Pour ce compost, la majeure partie des ETM se trouve dans la fraction fine < 50  $\mu\text{m}$  et la fraction [50  $\mu\text{m}$ -5 mm]L. Dans le compost OMR, la fraction [50  $\mu\text{m}$ -5 mm]L est également enrichie en C et N. Seuls Cu, Zn et Ni présentent une concentration supérieure dans cette fraction par rapport au compost total. Pour ce compost, ce sont plutôt les fractions minérales [50  $\mu\text{m}$ -5 mm]M qui sont les plus enrichies en Cr et Pb.

Les apports de composts ont pour effet une augmentation significative de la fraction [50  $\mu\text{m}$ -5 mm]L dans le sol uniquement dans le cas du traitement DVB. Cette fraction est classiquement

caractérisée par des teneurs en C organique mais également en Cu, Cd, Ni, Pb et Zn supérieures à celle du sol (Flores-Vélez *et al.*, 1996; Balabane *et al.*, 1999). L'effet des composts OMR s'observe également sur la concentration en ETM dans la fraction [50  $\mu\text{m}$ -5 mm]M. Les concentrations en HAP sont également supérieures dans la fraction [50  $\mu\text{m}$ -5 mm]L. Les fractions organiques sont *a priori* les fractions qui seront les plus utilisées par la faune et la microflore du sol essentiellement hétérotrophe. Des teneurs plus importantes en ETM ou HAP dans ces fractions organiques peuvent donc générer des risques plus importants de transfert vers les chaînes trophiques.

Les résultats de spéciation des ETM montrent des teneurs en ETM extractibles à l'EDTA supérieures dans les parcelles amendées en composts par rapport aux traitements témoins. Les différences sont plus marquées que pour les teneurs en ETM totaux. L'EDTA extrait les ETM complexés à la MO et liés aux carbonates (Lamy *et al.*, 2005). Les variations entre 2 épandages de ces quantités mobilisables sont minimes. Les différences les plus marquées avec les témoins sont observées pour Pb, Cu et Zn. Ces fractions mobilisables représentent des proportions variables des ETM totaux en fonction de l'élément:

50 % pour Cu et Cd, 25 % pour Pb, 10 % pour Ni et Zn, 0.2 % pour Cr.

Les quantités d'ETM échangeables, les plus disponibles vis-à-vis des cibles biologiques, sont beaucoup plus faibles (moins de 1 % des ETM totaux pour Cu, Zn et Cd). Ces quantités sont modulées par les effets des apports de compost sur les autres propriétés du sol. Ainsi, l'augmentation du pH du sol suite aux apports du compost OMR diminue le Zn échangeable qui est équivalent aux teneurs échangeables dans le traitement témoin et inférieur au Zn échangeable dans le traitement DVB.

## CONCLUSION

Nos résultats montrent un effet significatif des apports des composts sur les caractéristiques physico-chimiques des sols avec une augmentation des teneurs en C et N organique, une augmentation du pH dans le cas du compost OMR. Les apports de composts augmentent également les teneurs en ETM totaux pour Cu et Zn. Les conséquences des flux d'entrée des autres ETM et HAP via les composts ne sont pas détectables à l'analyse dans les sols. Les apports de composts modifient de façon plus marquée les quantités d'ETM potentiellement mobilisables révélées par des méthodes d'extraction chimique. Cependant, les fractions les plus facilement disponibles sont modulées par les autres effets des apports sur les propriétés des sols, en particulier le pH qui contribue à la diminution du Zn échangeable dans le traitement OMR. Les effets sur la composante biologique des sols sont présentés dans les articles de Leyval *et al.* (2009) et Capowiez *et al.* (2009) qui montrent des variations temporelles supérieures aux effets des apports sur la structure des communautés microbiennes et un effet positif des apports de composts sur la population de lombrics sans effet négatif observé sur aucun des indicateurs testés aux concentrations rencontrées dans ces sols agricoles soumis à épandage.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Jean-Noël Rampon pour son aide sur le terrain, Véronique Etiévant et Jean-Pierre Pétraud pour leur aide au laboratoire.

## BIBLIOGRAPHIE

- Alcock RE, MacGrath S.P., Jones K.C., 1995 - The influence of multiple sewage sludge amendments on the PCB content of an agricultural soil over time. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14, 4, 553-560.
- Annabi M., Houot S., Francou, F., Poitrenaud M., Le Bissonnais Y., 2007 - Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 2, 413-423.
- Balesdent J., 1996 - The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *European Journal of Soil Science*. 47, 485-493.
- Balabane M., Faivre D., van Oort F., Dahmani-Muller H., 1999 - Mutual effects of soil organic matter dynamics and heavy metals fate in a metallophyte grassland. *Environmental Pollution* 105 (1): 45-54
- Balabane M. et van Oort F., 2002 - Metal enrichment of particulate organic matter in arable soils with low metal contamination. *Soil Biology et Biochemistry* 34 (10): 1513-1516
- Barrioso E., Calvet R., Schiavon M., Soulas G., 1996 - Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformation et dissipation. Etude et gestion des sols, 3. 279-296.
- Brändli R., Kupper T., Bucheli T., Mayer J., Stadelmann F.X. et Tarradellas J., 2005 - Persistent organic pollutants in source-separated compost and its feedstock materials: a review of field studies. *J. Environ. Qual.* 34, 735-760.
- Brochier V., Deschamps M., Houot S., 2008 - Input of organic micropollutants in soil through compost application: possible transfer to plants. 6th International Conference ORBIT 2008. Moving organic waste recycling towards resource management and biobased economy. Wageningen, 13-15 Octobre 2008. Texte intégral.
- Capowiez Y., Rault M., Mazzia C., Poitrenaud M., Houot S., 2009 - Étude des effets des apports de produits résiduels organiques sur la macrofaune lombricienne en conditions de grandes cultures Etude et Gestion des sols. vol. 16/3-4, 175-185.
- Chang A.C. Page A.L., Warneke J.E., Grgurevic E., 1984 - Sequential extraction of soil heavy metals following a sludge application. *Journal of Environmental Quality*. 13, 1, 33-38.
- Flores Velez L.M., Ducaroir J., Jaunet A.M., Robert M., 1996 - Study of the distribution of copper in an acid sandy vineyard soil by three different methods. *European Journal of Soil Science* 47 (4): 523-532
- Hargreaves J.C., Adl M.S., Warman P.R., 2008 - A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123, 1-14.
- Houot S., 2005 - Recyclage de déchets sur les sols: valeur agronomique et impacts environnementaux. Dans « Sols et Environnement » MC Girard, C. Walter, JC Rémy, J. Berthelin, JL Morel éditeurs. Dunod, 262-284.
- Houot S., Clergeot D., Michelin L., Francou C., Bougeois S., Caria G., Ciesielski H., 2002 - Agronomic value and environmental impacts of urban composts used in agriculture. In: "Microbiology of composting", Insam H., Riddech N., Klammer S. (eds.), Springer, Berlin, 457-472.
- Jackson A.P., Alloway B.J., 1991 - The bioavailability of cadmium to lettuce and cabbage in soils previously treated with sewage sludges. *Plant and Soil*, 132, 2, 179-186.
- Kalassi M., Francou C., Effremenko B., Le Villio-Poitrenaud M., 2008 - Improvement of the quality of MSW compost. 6th International Conference ORBIT 2008. Moving organic waste recycling towards resource management and biobased economy. Wageningen, 13-15 Octobre 2008. Texte intégral.
- Lamy I., Sterckeman T., Cambier P., Jaffrezic A., Van oort F., Baize D., Chaussod R., Denaix L., Cornu S., 2005 - Présence et impact des éléments en traces dans les sols. Dans « Sols et Environnement » MC Girard, C. Walter, JC Rémy, J. Berthelin, JL Morel éditeurs. Dunod. 469-490.

- Leita L., De Nobili M., 1991 - Water-soluble fractions of heavy metals during composting of municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality*, 20, 1, 73-78.
- Leyval C., Steinberg C., Kuntz J., Beguiristain T., Edel-Hermann V., Leglise P., Gautheron N., Lebeau T., Houot S., 2009 - Impact d'amendements organiques sur la structure des communautés microbiennes des sols: choix des méthodes, validation et résultats. *Etude et Gestion des sols* vol. 16/3-4, 299-312.
- MacBride, M.B., 1995 - Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations prospective? *Journal of Environmental Quality*, 24, 1, 5-18.
- MacGrath S.P., Zhao F.J., Dunham S.J., Crosland A.R., Coleman K., 2000 - Long-term changes in the extractibility and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application. *Journal of Environmental Quality*, 29, 3, 875-883.
- Madrid F., Lopez R., Cabrera F., 2007 - Metal accumulation in soil after application of municipal solid waste composta under intensive farming conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119, 249-256.
- Martens, R., 1982 - Concentrations and Microbial Mineralization of 4 to 6 Ring Polycyclic Aromatic-Hydrocarbons in Composted Municipal Waste. *Chemosphere* 11, 761-770
- Pakou, C., Kornaros, M., Stamatelatu, K., Lyberatos, G., 2009 - On the fate of LAS, NPEOs and DEHP in municipal sewage sludge during composting. *Bioresour. Technol.* 100, 1634-1642
- Pinet C., Lecomte J., Vilmont V., Auburtin G., 2003 - Teneurs des plantes à vocation alimentaire en éléments traces métalliques suite à l'épandage de déchets organiques. Rapport final ADEME 0175048.
- Planquart P., Bonin G., Prone A., Massiani C., 1999 - Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts: application to low metal loadings. *Science of the total environment*, 241, 1/3, 161-179.
- Quevauviller P., 1998 - Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis. I Standardization. *Trends in analytical chemistry*, vol. 17, no. 5, 289-298.
- Richards B.K., Steenhuis T.S., Peverly J.H., McBride M.B., 2000 - Effect of sludge-processing mode, soil texture and soil pH on metal mobility in undisturbed soil columns under accelerated loading. *Environmental pollution*, 109, 327-346.
- Schaub A. Imhoff M., Valentin N., Montenach D., Bodineau G., Le Villio-Poitrenaud M., Houot S., 2007 - Bilan des éléments traces sur des parcelles de grandes cultures recevant des produits résiduels organiques. Retour au sol des produits organiques. Des essais au champ de longue durée: intérêt d'un réseau. Journée Technique Ademe-INRA-MRA, Colmar 27 Novembre 2007. 81-94.
- Smith S.R., 2009 - A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, 35, 142-156.
- Sogreah, 2007 - Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine. Ademe, Rapport final de contrat n° 0375 C 2004, 281 p.