

Effet de l'amendement par fumier de ferme et par compost d'ordures ménagères sur la restauration d'un sol argileux de plaine sous climat semi-aride tunisien

I. Jemai^(1*), S. B. Guirat⁽¹⁾, N. B. Aissa⁽²⁾, N. Jedidi⁽³⁾ et T. Gallali⁽¹⁾

- 1) Faculté des sciences de Tunis - Campus Universitaire - 1060 Tunis - Tunisie
- 2) Institut National d'Agronomie de Tunisie - 43, avenue Charles Nicolle 1082-Tunis Mahrajène - Tunisie
- 3) Centre de recherche et des technologies des eaux - Borj Cedria, 901-2050 Hammam Lif - Tunisie

* : Auteur correspondant : j_amaona20@yahoo.fr

RÉSUMÉ

En zone semi-aride, les amendements organiques sont de plus en plus utilisés pour leur potentiel de restauration des propriétés bio-physico-chimiques des sols. Le présent travail s'intéressera à l'étude de la stabilité structurale, de la densité apparente et des propriétés hydriques de l'horizon cultivé (0-20 cm) d'un sol alluvial, en culture céréalière, ayant reçu deux types d'amendements organiques : le fumier de ferme à raison de 40 t.ha⁻¹ (SF40) et le compost urbain à raison de 40 t.ha⁻¹ (SC40) et de 80 t.ha⁻¹ (SC80), durant 8 années successives. Le dispositif expérimental installé dans la ferme expérimentale de l'Institut National d'Agronomie de Tunisie (INAT) à Mornag, comporte 32 parcelles avec quatre répétitions pour chaque traitement, en plus du témoin n'ayant reçu aucun apport. Les résultats obtenus montrent que les amendements organiques utilisés ont diminué la densité apparente et l'indice d'instabilité structurale du sol et ils ont augmenté sa porosité totale et sa réserve en eau utile. En comparaison avec le traitement témoin (ST8), les traitements SF40, SC40 et SC80 ont diminué la densité apparente de 7 %, 8 % et 17 % respectivement et l'indice d'instabilité structurale de 4 %, 2 % et 9 % respectivement. La porosité totale se trouve plus élevée avec le traitement SC80, suivi des traitements SC40 et SF40. La microporosité a diminué avec les trois amendements organiques en faveur de l'augmentation de la macroporosité, alors que la réserve en eau utile a augmenté avec l'application du compost à ses différentes doses mais d'une manière légèrement plus importante avec le taux le plus élevé. Les effets plus importants du traitement SC80 sur les propriétés physiques de l'horizon cultivé pourrait être dus au contenu élevé du compost en acides humiques (13,39 g.kg⁻¹) et en cations polyvalents notamment Ca²⁺ (60 g.kg⁻¹) par rapport au fumier (6,07 g.kg⁻¹ d'acide humique et 9 g.kg⁻¹ de Ca²⁺).

Mots clés

Fumier, compost, structure, capacité de rétention d'eau, acide humique, stabilité structurale, densité apparente, porosité.

SUMMARY**EFFECT OF THE AMENDMENT BY FARMYARD MANURE AND MUNICIPAL SOLID WASTE COMPOST ON RESTORATION OF A LOWLAND CLAY SOIL UNDER TUNISIAN SEMI ARID CLIMATE**

In semi-arid area, there is a tendency towards the agricultural application of organic amendments for restoring soil organic matter (SOM) content and reclaiming degraded soils. The aim of this work was to investigate the influence of manure at dose of 40 t.ha⁻¹ (SF40) and two rates of compost: 40 t.ha⁻¹ (SC40) and 80 t.ha⁻¹ (SC80), on soil physical and hydraulic properties at 0-20 cm depth. A study was carried out over 8 years on Vertic Xero Fluvent, soil cultivated with wheat on the experiment of 32 plots of the experimental farm of the Agronomic National Institute of Tunis (INAT) in Mornag. With addition of manure and compost to soil, bulk density and structural instability index decreased while total porosity and available water content increased.

Comparatively to the control, SC80, SC40 and SF40 treatment have lowered bulk density by 17 %, 8 % and 7 % respectively and structural instability index by 4 %, 2 % et 9 % respectively. Total porosity was higher in the SC80 (6.29 %), followed by SC40 (2.89 %) and SF40 (3.9 %) treatments with respect to the control. Micro-porosity decreased with the three organic amendments and macro-porosity increased. While the available water content increased with compost application at its different doses but slightly larger with the highest rate. The stronger effects of SC80 on the physical proprieties at the soil surface could be doing to the higher humic acid (13,39 g.kg⁻¹) and polyvalent cations contents especially Ca²⁺ (60 g.kg⁻¹) of compost than of the manure (60,72 g.kg⁻¹ of humic acid and 9 g.kg⁻¹ of Ca²⁺).

Key-words

Manure, waste compost, structure, water retention curve, humic acid.

RESUMEN**EFFECTO DE LA ENMIENDA POR ESTIÉRCOL DE GRANJA Y POR COMPOST DE BASURAS DOMÉSTICAS SOBRE LA RESTAURACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO BAJO CLIMA SEMIÁRIDO TUNECINO**

En zona semiárida, las enmiendas orgánicas están más y más usadas para su potencial de restauración de las propiedades bio-físico-químicas de los suelos. Este trabajo se interesara al estudio de la estabilidad estructural, de la densidad aparente y de las propiedades hídricas del horizonte cultivado (0-20cm) de un suelo aluvial, con cultivo de cereales, que recibió dos tipos de enmiendas orgánicas: el estiércol de granja en una taza de 40t ha⁻¹ (SF40) y el compost urbano en una taza de 40 t ha⁻¹ (SC40) et de 80 t ha⁻¹ (SC80), durante 8 años sucesivos. El dispositivo experimental instalado en la granja experimental del Instituto Agronómico Nacional de Túnez (INAT) a Mornag, tiene 32 parcelas con cuatro repeticiones para cada tratamiento, además del testigo que no recibió ningún aporte. Los resultados obtenidos muestran que las enmiendas orgánicas usadas disminuyeron la densidad aparente y el índice de inestabilidad estructural del suelo y aumentaron su porosidad total y su reserva en agua útil. En comparación con el tratamiento testigo (ST8) los tratamientos SF40, SC40 y SC80 disminuyeron la densidad aparente de 7 %, 8% y 17 % respectivamente y el índice de inestabilidad estructural de 4 %, 2 % y 9 % respectivamente. La porosidad total se encuentra más elevada con el tratamiento SC80, seguido de los tratamientos SC40 y SF40. La microporosidad disminuyó en las tres enmiendas orgánicas a favor del aumento de la macroporosidad. La reserva en agua útil aumentó con la aplicación del compost a sus diferentes dosis pero de manera ligeramente más importante en la taza la más elevada. Los efectos más importantes del tratamiento SC80 sobre las propiedades físicas del horizonte cultivado podrían deberse al contenido elevado del compost en ácidos húmicos (13,39 g kg⁻¹) y en cationes polivalentes como Ca²⁺ (60 g kg⁻¹) en comparación al estiércol (6.07 g kg⁻¹ de ácidos húmicos y 9 g kg⁻¹ de Ca²⁺)

Palabras clave

Estiércol, compost, estructura, capacidad de retención en agua, ácido húmico, estabilidad estructural, densidad aparente, porosidad.

INTRODUCTION

Les sols des régions semi-arides à arides se trouvent à des stades alarmants de dégradation. En plus des pertes par érosions éolienne et hydrique, s'ajoute l'intensification agricole avec ses pratiques qui réduisent la quantité des résidus végétaux retournés au sol et accélèrent la minéralisation de l'humus (Tejada et Gonzalez, 2007) diminuant ainsi la réserve organique des sols et par conséquent augmentant la dégradation de leur fertilité chimique, biologique et physique. La perte de la fertilité du sol, suite à la diminution des taux de la matière organique, est accompagnée par la dégradation de la structure des agrégats, ceci peut se manifester par le tassement, la formation d'une semelle de labour et de croûtes superficielles, la réduction de la porosité du sol et de sa capacité à retenir l'eau.

Les sols de culture de la Tunisie, pays méditerranéen majoritairement à climat semi-aride, présentent des teneurs en matière organique très faibles dépassant rarement 1 % (Ben Achiba *et al.*, 2009) avec des propriétés physiques médiocres favorisant le ruissellement des eaux dans les régions de relief et l'engorgement des sols et la stagnation de l'eau en plaines. En conséquence, il est souvent nécessaire d'augmenter la teneur en humus des sols, essentiellement soumis à des cultures intensives, par incorporation d'amendements organiques. En effet, l'apport d'amendements organiques aux sols est devenu une pratique agronomique adéquate et indispensable pour la restauration des propriétés biologiques et physico-chimiques des sols (Haynes and Naidu, 1998; Dridi et Toumi, 1999; Yaduvanshi, 2001; Ming-Kui et Li-ping, 2007; Bram *et al.*, 2007; Gurpreet *et al.*, 2007; Tejada et Gonzalez, 2007).

Toutefois, le fumier de ferme qui était traditionnellement utilisé comme principal amendement organique dans l'agriculture tunisienne devient de plus en plus rare et cher. Ce problème a poussé vers l'exploitation de nouvelles sources de matière organique tel que le compost des déchets solides urbains. En plus, il permet de mieux gérer le volume de ces déchets sans cesse croissant.

Plusieurs travaux ont mis en évidence le gain quantitatif et qualitatif apporté par le compost d'ordures ménagères et le fumier sur les sols cultivés en combinaison ou non avec un fertilisant minéral (Avnimelech *et al.*, 1990; Soudi *et al.*, 1992; Dridi *et al.*, 1999; Hamdi *et al.*, 2002; Tejada et Gonzalez, 2007; Evanylo *et al.*, 2008; Hargreaves *et al.*, 2008; Cherif *et al.*, 2009; Warman *et al.*, 2009).

En Tunisie, quelques études préliminaires ont été menées pour évaluer l'impact de l'application du fumier et du compost de déchets urbains comme amendement organique. Ces études ont surtout porté sur les effets sur la biomasse microbienne du sol (Bouzaiane *et al.*, 2007; Jedidi *et al.*, 2004), sur les rendements des cultures (Hamdi *et al.*, 2002) et sur la distribution des métaux lourds dans le sol (Ben Achiba *et al.*, 2009, 2010 et Cherif *et al.*, 2009) et dans les différentes parties de la plante. Par contre, l'ef-

fet des amendements organiques sur les propriétés physiques du sol n'a pas été assez abordé.

L'objectif de ce travail est d'étudier à long terme (durant huit années consécutives), les effets comparés d'apport de fumier de ferme à raison de 40 t.ha⁻¹ et de compost urbain, à raison de 40 t.ha⁻¹ et 80 t.ha⁻¹ sur les principales propriétés physiques d'un sol de culture de la plaine de Mornag dont les sols sont sujets à un engorgement et à une stagnation d'eau, sachant que le régime pluvial de la région est du type irrégulier et à caractère torrentiel. Ces sols présentent les caractéristiques des sols de la plupart des plaines alluviales du Nord de la Tunisie (Jedidi, 1998).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Site et dispositif expérimental

L'expérimentation au champ a été conduite depuis 2000, dans la ferme expérimentale de l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT), située dans la région de Mornag (36°41N 10°19E), 20 km au sud de Tunis (*figure 1*). Le climat est de type semi-aride supérieur à hiver doux. Il se caractérise par une distribution irrégulière des précipitations durant toute l'année (*tableau 1*) avec une moyenne annuelle de 500 mm. La température moyenne annuelle est de 18 °C. La parcelle expérimentale, couvrant une superficie de 1006 m², a été subdivisée en 32 parcelles élémentaires de 8 m² (4x2 m), réparties de manière aléatoire avec quatre répétitions pour chaque traitement, y compris les parcelles élémentaires témoins (ST8). Les traitements appliqués, sur huit années successives, sont 40 t.ha⁻¹ de fumier de ferme (SF40), du compost d'ordures ménagères à 40 t.ha⁻¹ (SC40) et à 80 t.ha⁻¹ (SC80), des amendements combinés organo-minéraux (ammonitrate (NH₄NO₃) et superphosphate) SF40+E, SC40+E et SC80+E, des engrais (ST8+E). Pour cette étude, seuls les traitements organiques ont été choisis. Les amendements sont appliqués manuellement, à la surface du sol avant le semis, puis incorporés au sol par bêchage.

Sol

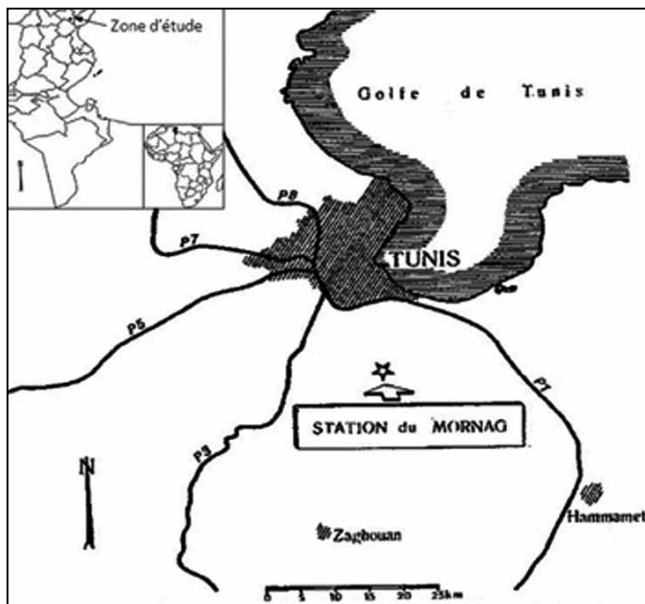
Le sol étudié est de type peu évolué d'apport alluvial à caractère vertique (CPCS 1967) - FLUVIOSOL vertique (référentiel pédologique - AFES, 2009) - Vertic Xero Fluvent (Soil Taxonomy). Il représente environ 50 % des terres cultivées dans le Nord de la Tunisie, soit plus d'un million d'hectares. C'est un sol profond à profil homogène de type A/C dont les principales caractéristiques physico-chimiques, avant la conduite de l'expérimentation, sont présentées dans le *tableau 2*. Il est composé de près de 50 % d'argile, dont 1/3 de smectites et 2/3 de kaolinites.

La granulométrie a été réalisée par la méthode de sédimentation (pipette de Robinson). Le pH a été mesuré par la méthode électrométrique avec un rapport terre/eau de 1/2,5. La conducti-

Tableau 1 - Pluviométrie moyenne mensuelle en mm dans la région de Mornag calculée sur dix-huit ans (1990-2008).**Table 1** - Monthly average rainfall in mm in the Mornag region calculated over eighteen years (1990-2008).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fèv	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
P mensuelles	50,9	53,4	56,3	70,9	75,2	51,2	31,6	32,3	28,3	19,6	2,2	4,7
P saisonnières	160,6			197,3			92,2			26,5		
P annuelles	476,4											

P: Précipitations

Figure 1 - Localisation du site d'étude.**Figure 1** - Location of the study site.**Tableau 2** - Caractéristiques analytiques de l'horizon 0-20 cm du sol étudié avant conduite de l'expérimentation (Moyenne \pm écart type).**Table 2** - Analytical characteristics of 0-20 cm studied soil horizon before conducting experiments (Mean \pm S. D).

Paramètre	sol
Argile $< 2 \mu\text{m}$ (g.kg^{-1})	449 \pm 50,9
Limon $2-50 \mu$ (g.kg^{-1})	461,1 \pm 69,5
Sable $50-2000 \mu\text{m}$ (g.kg^{-1})	59,7 \pm 18,5
pH (H_2O)	8,1 \pm 0,14
CE ($\mu\text{S/cm}$)	4
CaCO_3 Total (g.kg^{-1})	183,5 \pm 3,5
CaCO_3 Actif (g.kg^{-1})	95,2 \pm 2,2
C (g.kg^{-1})	8,7 \pm 0,1
N (g.kg^{-1})	0,95 \pm 0,01
C/N	9,15
MO (g.kg^{-1})	14,96 \pm 0,1
CEC (meq kg^{-1})	245 \pm 7,1

tivité électrique (CE) a été mesurée dans une suspension de sol et d'eau de rapport 1/5. Le calcaire total (CaCO_3 Total) a été déterminé à l'aide de calcimètre de Bernard, le calcaire actif (CaCO_3 Actif) a été dosé selon la méthode Drouineau. La capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée à travers l'extraction des cations échangeables par l'acétate d'ammonium ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$) 1N. Le carbone organique total (C_T) a été déterminé par pyrolyse oxydative à 950 °C au Carmhograph, et l'azote organique total (N) a été mesuré par la méthode Kjeldhal.

Les amendements organiques

Les amendements organiques appliqués sont le fumier de ferme pailleux et le compost d'ordures ménagères. Le fumier est obtenu à partir des déjections d'ovins et de paille de blé et stabilisé

pendant une année. Le compost est apporté de la station pilote de compostage de la ville de Beja, située à environ 100 km à l'Ouest de Mornag. Il est fabriqué par fermentation aérobie, à partir d'un mélange des fractions organiques des ordures ménagères, obtenus après tri sélectif, et des déchets des jardins de la ville de Béja. Les andins sont stabilisés pendant 5 mois. Les caractéristiques physico-chimiques ainsi que les teneurs en acides humiques et fulviques des amendements sont présentés dans le *tableau 3*.

Echantillonnage et analyse du sol

Les échantillons du sol ont été prélevés en novembre 2008, juste avant les apports organiques au sol (soit une année après

Tableau 3 - Caractéristiques des amendements organiques utilisés dans l'essai (Moyenne \pm écart type).**Table 3** - Characteristics of organic amendments used in the experiment (Mean \pm S. D).

Paramètres	Compost	Fumier
pH (H ₂ O)	7,6 \pm 0,4	6,2 \pm 0,3
CE (μ S/cm)	1005 \pm 55	1325 \pm 63
C (g.kg ⁻¹)	202 \pm 28	360 \pm 36
N (g.kg ⁻¹)	16,2 \pm 2,2	13 \pm 5
C/N	12,47	27,7
CEC (meq kg ⁻¹)	331 \pm 41	246 \pm 37
K ⁺ (g.kg ⁻¹)	5,2	7,1
Ca ²⁺ (g.kg ⁻¹)	60	9
Na ⁺ (g.kg ⁻¹)	2,7	0,67
Mg ²⁺ (g.kg ⁻¹)	3,46	1,9
AH (g.kg ⁻¹)	13,386	6,07
AF (g.kg ⁻¹)	14,65	6,46
Métaux lourds ^a (mg kg ⁻¹)		
Cu	278 \pm 22	26 \pm 3
Zn	410 \pm 26	120 \pm 18
Pb	325 \pm 24	10 \pm 1
Cd	3.3 \pm 0,4	0,7 \pm 0,2
Ni	44 \pm 7	22 \pm 4
Cr	52 \pm 9	24 \pm 3

CE: conductivité électrique; C: carbone organique total; N: azote organique total; CEC: capacité d'échange cationique; AH: acide humique; AF: acide fulvique.

^a Ben Achiba et al. (2009 et 2010)

les apports de la campagne précédente). Sur chaque parcelle élémentaire, cinq échantillons de sol ont été prélevés sur une profondeur de 20 cm, puis mélangés pour obtenir un échantillon composite. L'étude des paramètres physiques et hydriques du sol a été réalisée sur des échantillons du sol séchés à l'air et tamisés à 2 mm.

La densité apparente est déterminée directement sur le terrain avant le semis en employant des cylindres métalliques de 176,6 cm³ de volume qui sont enfoncés horizontalement dans l'horizon 0-20 cm. Le sol collecté dans les cylindres est séché à 105 °C pendant 48 heures puis pesé pour déterminer le poids sec. La densité apparente est calculée à partir du rapport poids sec/volume de cylindre.

La densité réelle est considérée égale à 2,65 g cm⁻³. La porosité totale est déterminée à partir de la formule suivante:

$$PT = (dr-da)/dr$$

La stabilité structurale a été mesurée au laboratoire par la méthode de Henin et al (1958) qui permet de mettre en évidence les phénomènes de dégradation de la structure par l'eau. Elle

est basée sur deux tests complémentaires: le test d'analyse d'agrégats qui permet de mesurer le taux d'agrégats stables et de calculer un indice d'instabilité structurale (indice Is) et le test de perméabilité. Le premier test présente l'avantage de faire intervenir plusieurs types d'actions déstructurantes ce qui permet d'accroître ainsi la représentativité des résultats (Musy et Soutter, 1991). Il s'agit de déterminer la proportion d'agrégats stables de taille supérieure à 200 μ m après prétraitements à l'alcool et au benzène puis traitement, à l'eau, et parallèlement de mesurer la quantité d'éléments fins (argile + limons fins) (0-20 μ m), à la pipette de Robinson qui, sans dispersion préalable, sont mis en suspension au cours de ces opérations. Les traitements et prétraitements (eau, alcool et benzène) de cette méthode permettent l'évaluation de deux principaux facteurs impliqués dans la stabilité structurale, qui sont texture des sols et teneur en matière organique (De Orellana et Pilatti, 1994). Le traitement avec l'eau indique le degré de perturbation de destruction des agrégats. Le prétraitement avec l'alcool réduit la perturbation des agrégats en raison du processus de mouillage parce qu'il

facilite l'expulsion de l'air, permettant l'évaluation des forces de cohésion entre les particules. Le prétraitement avec le benzène prend en compte la teneur de matière organique présente dans les agrégats. L'indice d'instabilité structurale est déterminé à partir de la formule suivante :

$$I_s = \frac{(A + LF) \max}{\frac{(Aga + Agb + Age)}{3} - 0,9 SG}$$

Avec :

Aga: pourcentage d'agrégats stables obtenus après prétraitement à l'alcool, et traitement à l'eau

Agb: pourcentage d'agrégats stables obtenus après prétraitement au benzène, et traitement à l'eau

Age: pourcentage d'agrégats stables après traitement à l'eau, (A+LF): plus grand pourcentage des éléments fins (0-20 µm) obtenu pour un des trois traitements.

SG: sables grossiers contenus dans la fraction agrégats stables

Le test de perméabilité permet de mesurer une vitesse d'infiltration de l'eau (indice K) par percolation à travers un échantillon de terre séchée et tamisée à 2 mm, sous une charge d'eau constante ce qui met en évidence la résistance à la destruction des agrégats sous une infiltration contrôlée (Monnier, 1994).

La vitesse d'infiltration ou perméabilité se calcule selon cette formule :

$$K \left(\frac{\text{cm}}{\text{h}} \right) = \frac{eV}{HS}$$

Avec :

e: Hauteur (cm) de la colonne de terre

V: Volume d'eau percolé (cm³)

H: Hauteur (cm) de la charge d'eau

S: Section intérieure de tube (cm²)

Les mesures des teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent ont été réalisées selon la méthode de la chambre à pression où les pressions appliquées sont respectivement de l'ordre de 1/3 atm et 15 atm (soit 333hPa et 15000hPa). Après 24 heures sous pression, on détermine le poids humide (Ph) de chaque échantillon et son poids sec (Ps) après 24 heures de séchage à l'étuve à 105 °C (Mathieu et Pieltain, 1998). L'humidité pondérale du sol (Ws) aux différents potentiels a été mesurée selon la relation suivante :

$$W_s = \frac{Ph - P_s}{P_s} \cdot 100$$

Les teneurs en eau volumique sont obtenues par simple multiplication des teneurs en eau pondérale par la densité apparente mesurée sur le terrain. La réserve en eau utile a été déterminée ensuite par la différence entre teneur en eau volumique retenue à -333 et -15000 hPa. La microporosité a été déterminée par la teneur en eau volumique à la capacité au champ. La macroporosité a été calculée comme la différence entre la porosité totale et la microporosité.

Fractionnement de la matière organique

L'extraction des composés humiques des sols traités et des amendements appliqués a été faite à l'aide de réactifs alcalins à savoir le pyrophosphate de sodium 0,5 N et l'hydroxyde de sodium 0,5 N. La séparation des AH et AF a été faite suite à l'acidification des extraits alcalins par l'acide chlorhydrique 4 N jusqu'à pH = 1.5 (Schnitzer et Khan, 1972).

Le carbone organique, associé avec la fraction AH extraite du sol, est mesuré en utilisant Carbon Analyser (Schimazu, modèle TOC 5050 A).

Analyse statistique

Le logiciel XLSTAT version 5.03 a été utilisé pour l'analyse de variance (ANOVA) à un facteur et la comparaison multiple entre les moyennes a été effectuée par le test de Newman - Keuls afin de détecter les différences significatives entre les traitements avec un niveau de probabilité de 5 %.

Le coefficient de corrélation de Pearson a été utilisé pour tester les relations entre la matière organique, les différentes fractions de carbone organique et les paramètres physiques du sol (tableau 8).

RÉSULTATS

Teneur en matière organique

Les résultats du tableau 4 montrent qu'après 8 ans de la conduite de l'expérimentation, la teneur en matière organique (MO), en azote totale (N_T) ainsi que les différentes fractions de carbone organique ont augmenté dans les traitements SC40, SC80 et SF40 par rapport au traitement ST8. Néanmoins, les différences ne sont significatives entre le témoin et les traitements organiques que pour N et la fraction du carbone inférieure à 50 µ (C_{<50 µ}). Les amendements organiques ont contribué d'une manière similaire à augmenter la teneur en N du sol alors que l'amélioration des teneurs en C_{<50 µ} est plus importante avec le sol amendé par une dose double de compost.

À même dose, le compost enrichit plus le sol en carbone organique totale (C_T) et C_{<50 µ} que le fumier bien que la quantité de carbone appliqué au sol soit beaucoup plus grande avec l'ajout de fumier (tableau 3). Cependant, le taux d'humification est plus prononcé avec SC40 et SC80 où le contenu de carbone d'acide humique (C_{AH}) est plus élevé que celui de SF40.

Bien que le traitement SC80 apporte deux fois plus d'AH au sol, il a contribué d'une façon similaire à augmenter le C_{AH} du sol et le traitement SC40.

Tableau 4 - Teneur des sols en matière organique (Moyenne \pm écart type).**Table 4** - Soils organic matter content (Mean \pm S. D).

Paramètres	ST0	ST8	SC40	SC80	SF40
MO (g Kg ⁻¹)	15 \pm 0,1	17,2 \pm 0,86 ^a	24,1 \pm 0,45 ^a	25,8 \pm 0,62 ^a	22,4 \pm 0,96 ^a
C _T (g.kg ⁻¹)	8,7 \pm 0,1	10 \pm 1,73 ^a	14 \pm 2,65 ^a	15 \pm 3,61 ^a	13 \pm 1,00 ^a
N _T (g.kg ⁻¹)	0,95 \pm 0,02	1,4 \pm 0,01 ^a	1,8 \pm 0,01 ^b	1,9 \pm 0,01 ^b	1,9 \pm 0,01 ^b
C/N	9,15	7,14 ^a	7,77 ^b	7,90 ^c	6,84 ^d
C _{<50 μ} (g Kg ⁻¹)	ND	04,2 \pm 0,32 ^a	11,3 \pm 0,36 ^b	13,2 \pm 1,06 ^c	08,2 \pm 0,32 ^d
C _{AH} (g Kg ⁻¹)	ND	0,03 \pm 0,01 ^a	0,05 \pm 0,02 ^a	0,05 \pm 0,02 ^a	0,04 \pm 0,01 ^a

MO = C * 1,72

ST0: Sol témoin au temps 0.

ND: Non déterminé

Les valeurs marquées par des lettres différentes dans chaque ligne sont significativement différentes ($P < 0,05$) selon le test de Newman-Keuls.

Tableau 5 - Densité apparente (da), porosité totale (PT) microporosité (MiP) et macroporosité (MaP) dans le sol témoin et les sols amendés, 8 ans après l'apport organique (Moyenne \pm écart type).**Table 5** - Bulk density (da), total porosity (PT), microporosity (MiP) and macroporosity (MaP) in control and amended soils, 8 years after the organic amendment (Mean \pm S.D).

Traitements	da (g cm ⁻³)	PT (%)	MiP (%)	MaP (%)
ST8	1,44 \pm 0,01 ^a	45,66 \pm 0,38 ^a	43,91 \pm 0,30 ^a	01,75 \pm 0,68 ^a
SC40	1,36 \pm 0,02 ^b	48,55 \pm 0,58 ^b	42,15 \pm 0,47 ^b	06,41 \pm 1,05 ^b
SC80	1,27 \pm 0,01 ^c	51,95 \pm 0,22 ^c	39,08 \pm 0,18 ^c	12,87 \pm 0,40 ^c
SF40	1,37 \pm 0,06 ^b	49,56 \pm 1,15 ^b	43,53 \pm 0,99 ^a	06,03 \pm 2,15 ^b

Dans chaque colonne les valeurs marquées par des lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$) selon le test de Newman-Keuls.

Structure du sol

Densité apparente et porosité

Les résultats relatifs à la densité apparente, la porosité totale, la microporosité et la macroporosité sont représentés dans le tableau 5.

Les traitements SC40, SC80 et SF40 ont réduit significativement la densité apparente par rapport au traitement ST8 de 8 %, 17 % et 7 %, respectivement. Toutefois, les traitements SC40 et SF40 ont contribué de manière équivalente à la diminution de ce paramètre, alors que cette diminution est significativement plus importante avec le traitement SC80.

La porosité totale a été significativement ($P < 0,05$) affectée par les traitements et était la plus élevée dans le traitement SC80. Les traitements SC40 et SF40 ont eu des effets similaires sur la porosité totale du sol, tandis que l'effet du traitement du compost a été moins prononcé que celui du fumier. La microporosité ou porosité capillaire (pores $< 50 \mu\text{m}$, (Pagliai et Antisari, 1993)) a

été diminuée par les différents amendements organiques appliqués mais les différences ne sont significatives qu'avec les traitements SC40 et SC80 où la diminution par rapport au témoin est de 1,76 % et 4,83 % respectivement, alors que la macroporosité (pores $> 50 \mu\text{m}$, (Pagliai et Antisari, 1993)), qui est de 1,75 % dans ST8, a augmenté significativement de 11,12 %, 4,66 % et de 4,28 % avec SC80, SC40 et SF40 respectivement. Cette augmentation est significativement ($p < 0,0001$) compensée par la diminution de la microporosité au niveau de ces traitements (tableau 8). Par conséquent les amendements organiques appliqués dans cette étude ont contribué à la transformation d'une partie de micropores aux macropores. Cette transformation est plus importante avec le traitement SC80. Le traitement du sol étudié par une dose de 80 t.ha⁻¹ de compost serait donc plus intéressant pour augmenter l'infiltration d'eau et le drainage.

La stabilité structurale du sol

Le test de la stabilité structurale préconisé par Hénin *et al.*

Tableau 6 - Effet des amendements sur les agrégats stables > 200 µm, l'indice d'instabilité structurale (log 10Is) et le coefficient du test d'infiltration (K) (moyenne±écart type).

Table 6 - The effect of amendments on stable aggregates > 200 µm, structural instability index (log 10Is) and infiltration coefficient test (K) (mean ±S.D.).

Traitements	Age	Aga	Agb	log 10Is	K (cm h ⁻¹)
ST8	47,07 ± 0,68 ^a	66,30 ± 2,17 ^a	1,87 ± 0,12 ^a	1,25 ± 0,01 ^a	1,55 ± 0,18 ^a
SC40	43,83 ± 2,48 ^b	65,37 ± 1,91 ^a	6,57 ± 0,47 ^b	1,23 ± 0,01 ^a	1,70 ± 0,09 ^a
SC80	42,80 ± 0,95 ^b	66,47 ± 1,10 ^a	13,20 ± 0,17 ^c	1,16 ± 0,02 ^b	2,36 ± 0,19 ^b
SF40	42,93 ± 1,96 ^b	69,10 ± 0,78 ^a	6,90 ± 0,46 ^b	1,21 ± 0,02 ^a	1,65 ± 0,03 ^a
Normes d'interprétation de la stabilité structurale du sol d'après Baize (1998)					
Stabilité Structurale			log 10Is		
Très stables			≤ 1,00		
Stables			1,00 - 1,30		
Stabilité médiocre			1,30 - 1,70		
Instables			1,70 - 2,00		
Très instables			≥ 2,00		

Age: agrégats obtenus après prétraitement à l'eau; **Aga:** agrégats obtenus après prétraitement à l'alcool; **Agb:** agrégats obtenus après prétraitement au benzène.

Dans chaque colonne les valeurs marquées par des lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$) selon le test de Newman-Keuls.

(1958) montre que le pourcentage des Aga est plus important que celui des Age et Agb pour tous les traitements (tableau 6) déduisant par conséquent l'importance de la cohésion interne des agrégats. Cette cohésion n'est pas corrélée significativement à la MO, C_T et $C_{<50\mu}$ (tableau 8), mais elle augmente significativement ($p < 0,1$) lorsque le C_{AH} diminue, elle est donc peut-être liée aux argiles.

Les Agb se trouvent en faible quantité dans le sol étudié par rapport aux Age et Aga montrant la faible action de la matière organique sur la stabilité des agrégats. Néanmoins, la quantité d'Agb se trouve respectivement à 1,87 %, 6,57 %, 13,20 % et 6,90 % dans les traitements ST8, SC40, SC80 et SF40. Comme dans le tableau 8, le pourcentage d'Agb montre une corrélation significative ($p < 0,1$) avec les teneurs de MO et de C_T et hautement significative ($p < 0,0001$) avec les teneurs de $C_{<50\mu}$, les traitements SC40, SC80 et SF40 ayant un contenu en Agb significativement plus élevé que le traitement ST8 montrent le rôle prépondérant du carbone humifié dans la formation des agrégats > 200 µm. L'action de la matière organique en général et du carbone humifié en précision sur l'agrégation du sol s'avère plus évidente voire maximum (presque x 7) avec le traitement SC80 (tableau 6).

En comparaison avec ST8, les amendements appliqués ont contribué d'une manière équivalente et significative à diminuer les proportions d'agrégats > 200 µm stables à l'eau traduisant ainsi la diminution de la résistance des agrégats à l'éclatement sous l'action d'humectation rapide. Dans ce cas, la diminution d'Age est compensée par l'augmentation d'Agb (tableau 8).

L'indice d'instabilité structurale (log10Is) est diminué par rapport à ST8 de 2 %, 9 % et 4 % dans SC40, SC80 et SF40 respectivement. Cette diminution est corrélée à l'augmentation d'agrégats stabilisés par la matière organique et du coefficient du test de perméabilité (tableau 8). Cependant, les différences pour le test d'instabilité structurale et le test de perméabilité ne sont significatives que pour le traitement SC80 (tableau 6) déduisant ainsi une résistance plus importante à la destruction des agrégats sous différentes actions mécaniques et sous une infiltration contrôlée.

Par conséquent, la stabilité structurale des agrégats a été améliorée au cours du temps par les amendements organiques appliqués et en particulier par la dose de 80 t.ha⁻¹ de compost ce qui réduit d'avantage la sensibilité du sol à l'érosion, la compaction et la croûte de battance, etc.

Les capacités de rétention en eau

Les mesures de rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent montrent que les traitements SC40 et SC80 ont réduit significativement les teneurs en eau volumique (tableau 7). Cette réduction qui est plus évidente avec le traitement SC80 peut être liée à la transformation d'une partie de la porosité fine en macroporosité. Le traitement SF40 a donné des humidités volumiques significativement similaires à celles trouvées avec le traitement ST8. En revanche, l'application du compost aux différentes doses a amélioré significativement et de même ordre la réserve utile en eau, qui correspond à la

Tableau 7 - Effet des traitements sur l'humidité volumique à la capacité au champ (Hcc) et au point de flétrissement permanent (Hfp) et sur la réserve utile en eau (RU) (moyenne±écart type).**Table 7** - Effect of treatments on volumetric humidity at field capacity (Hcc) and permanent wilting point (Hfp) and on available water content (RU) (mean ±S.D.).

Traitements	Hcc %	Hfp %	RU %
ST8	43,91 ± 0,30a	32,05±0,22a	11,86±0,08a
SC40	42,15 ± 0,47b	29,91±0,34b	12,23±0,14b
SC80	39,08 ± 0,18c	26,83±0,12c	12,25±0,06b
SF40	43,53 ± 0,99a	32,15±0,73a	11,38±0,26c

Dans chaque colonne les valeurs marquées par des lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$) selon le test de Newman-Keuls.

Tableau 8 - Coefficient de corrélation de Pearson (r) pour les propriétés physiques du sol avec la matière organique et les différentes fractions du carbone organique.**Table 8** - Pearson's correlation coefficients (r) of physical soil properties with organic matter and total organic carbon.

Variables	Age	Aga	Agb	log10Is	K	densité	PT	MiP	MaP	RU	C _T	C _{<50μ}	C _{AH}	MO
Age	1	-0,319	-0,629*	0,412	-0,480	0,800*	-0,800*	0,545*	-0,713*	0,129	-0,642*	-0,595*	0,001	-0,642*
Aga	-0,319	1	0,012	-0,233	-0,064	-0,193	0,193	0,179	0,024	-0,682*	0,374	-0,189	-0,502*	0,374
Agb	-0,629*	0,012	1	-0,888*	0,878*	-0,948**	0,948**	-0,892**	0,963**	0,375	0,607*	0,897*	0,482	0,607*
log10Is	0,412	-0,233	-0,888*	1	-0,824*	0,791*	-0,791*	0,707*	-0,785*	-0,302	-0,644*	-0,720*	-0,417	-0,644*
K	-0,480	-0,064	0,878*	-0,824*	1	-0,763*	0,763*	-0,875*	0,849*	0,511*	0,553*	0,714*	0,296	0,553*
densité	0,800*	-0,193	-0,948**	0,791*	-0,763*	1	-1,000**	0,836*	-0,965**	-0,131	-0,643*	-0,834*	-0,323	-0,643*
PT	-0,800*	0,193	0,948**	-0,791*	0,763*	-1,000**	1	-0,836*	0,965**	0,131	0,643*	0,834*	0,323	0,643*
MiP	0,545*	0,179	-0,892**	0,707*	-0,875*	0,836*	-0,836*	1	-0,951**	-0,554*	-0,568*	-0,825*	-0,325	-0,568*
MaP	-0,713*	0,024	0,963**	-0,785*	0,849*	-0,965**	0,965**	-0,951**	1	0,339	0,635*	0,866*	0,338	0,635*
RU	0,129	-0,682*	0,375	-0,302	0,511*	-0,131	0,131	-0,554*	0,339	1	0,233	0,560*	0,479	0,233
C_T	-0,642*	0,374	0,607*	-0,644*	0,553*	-0,643*	0,643*	-0,568*	0,635*	0,233	1	0,650*	0,063	1,000**
C_{<50μ}	-0,595*	-0,189	0,897**	-0,720*	0,714*	-0,834*	0,834*	-0,825*	0,866*	0,560*	0,650*	1	0,635*	0,650*
C_{AH}	0,001	-0,502*	0,482	-0,417	0,296	-0,323	0,323	-0,325	0,338	0,479	0,063	0,635*	1	0,063
MO	-0,642*	0,374	0,607*	-0,644*	0,553*	-0,643*	0,643*	-0,568*	0,635*	0,233	1,000*	0,650*	0,063	1

Les valeurs marquées par une étoile sont significatives à $p < 0,1$.

Les valeurs marquées par deux étoiles sont significatives à $p < 0,0001$.

porosité de stockage (0,5-50 μm, Pagliai et Antisari (1993)). Bien que cette amélioration soit légère, elle peut être due à la transformation des micropores aux micropores plus grossiers. En conséquence, la réserve d'eau utilisable augmente faiblement en quantité pour les sols amendés par compost mais sa disponibilité pour les plantes serait plus facile.

DISCUSSION

Teneur en matière organique

L'amendement du sol par le compost et le fumier pendant 8 ans a augmenté les teneurs en différentes fractions de la matière organique ce qui rejoint les résultats de Fernández *et al.* (2007); Hemmat *et al.* (2010); Ming-Kui et Li-ping (2007), Gurpreet *et al.* (2007), Tejada *et al.* (2007) et Bastida *et al.* (2008). Toutefois, les teneurs de N_T et $C_{<50\mu}$ dans le sol sont significativement plus élevées avec l'application d'une dose double de compost, confirmant ainsi les résultats trouvés par Giusquiani *et al.* (1995); Izaurralde *et al.* (2001); Fabrizio *et al.* (2009), Fernández *et al.* (2007) et Fabrizio *et al.* (2007). Par contre Körschens et Müller (1996) et Smith *et al.* (2000) ont montré que le pourcentage de carbone accumulé reste constant ou décroît avec l'augmentation de la dose de matière organique appliquée. D'après Fabrizio *et al.* (2009), l'explication possible dans ce cas serait que le compost utilisé dans cette expérience, du fait de sa grande stabilité, apporte plus de carbone récalcitrant (difficilement utilisable), et que les autres expériences auraient pu utiliser du compost riche en carbone labile plus dégradable.

Malgré le taux élevé de C_T dans le fumier par rapport au compost, l'application répétée de fumier au sol pendant 8 ans à même dose que le compost semble accroître dans une moindre mesure le stock de C_T dans le sol; de plus le rapport C/N se trouve plus faible dans la parcelle amendée par le fumier. Ceci suggère l'importance des processus de minéralisation avec l'addition de cet amendement. En effet, Clemente *et al.* (2006) ont montré qu'après 56 jours d'incubation d'un sol calcaire sablo-limoneux, le taux de minéralisation du C_T est plus élevé dans le sol traité par un fumier frais que dans le sol traité par un compost stabilisé. Ils ont trouvé aussi que la quantité de CO_2 dégagé après 56 jours d'incubation était significativement plus faible dans le sol témoin ($212 \pm 27 \mu\text{g C.g}^{-1}$) et dans les sols traités avec du compost ($585 \pm 23 \mu\text{g C.g}^{-1}$) que dans le sol recevant le traitement du fumier ($2619 \pm 3,3 \mu\text{g C.g}^{-1}$). Ainsi, selon leur étude, le fumier par sa forte concentration en composés organiques facilement dégradables a montré la plus grande activité microbienne, alors que la matière organique présente dans le compost a été plus résistante à la dégradation que celle de fumier, montrant une plus grande stabilité microbiologique. De ce fait le taux de minéralisation du C_T est plus rapide avec l'ajout du fumier.

Par conséquent, le compost par sa richesse en AH et AF, composés stables et assez bien pourvus en carbone (*tableau 3*), a contribué à mieux séquestrer du carbone dans le sol que le fumier.

Le taux de C_{AH} dans le sol est positivement affecté par les amendements appliqués. En effet, l'augmentation de cette fraction du carbone organique dans les sols amendés peut être due à la fois à la richesse de leurs composés organiques en AH et à

l'apport du carbone organique qui stimule la microfaune indigène du sol impliquée dans le processus d'humification. Cependant, le contenu de C_{AH} est plus élevé dans le sol traité par 40 et 80 t.ha⁻¹ de compost que dans le sol traité par 40 t.ha⁻¹ de fumier bien que les différences ne soient pas significatives entre les traitements.

La restauration de la matière organique du sol par épandage du compost a été fréquemment abordée dans la littérature. Néanmoins, l'application répétée de compost d'ordures ménagères peut générer dans certains cas l'accumulation des métaux lourds dans le sol (Iwegbue *et al.*, 2007; Qiao *et al.*, 2003; Kidd *et al.*, 2007). Or les concentrations excessives de certains métaux peuvent affecter les microorganismes du sol et leur activité en diminuant la biomasse microbienne, en inhibant l'activité enzymatique et en changeant la structure de la communauté microbienne (Giller *et al.*, 1998).

Ainsi l'amendement du sol par le compost de déchets urbains pendant 9 ans (Garcia-Gil *et al.*, 2000) dans un environnement semi-aride a engendré une augmentation des teneurs en Zn, Cu et Pb du sol et une diminution de la teneur de biomasse microbienne d'autant plus importants que la dose de compost appliqué augmente.

Par conséquent, la différence non significative entre le contenu en C_{AH} dans SC40 et SC80 peut être attribuée aux métaux lourds ajoutés par la double dose de compost (*tableau 9*) qui auraient exercé un certain effet toxique sur la biomasse microbienne du sol SC80 inhibant son activité biologique et diminuant en conséquence le processus d'humification responsable de la fabrication des composés humiques y compris les acides humiques.

De même, l'étude menée, antérieurement, sur le même dispositif expérimental, par Bouzaaine *et al.* (2007) a révélé que lorsque la quantité de compost passe de 40 à 80 t.ha⁻¹ la biomasse microbienne (déterminée par le carbone et l'azote) a diminué de façon significative déduisant ainsi qu'un taux d'application de compost de 40 t.ha⁻¹ a de meilleurs effets sur la croissance des micro-organismes que l'application de 80 tonnes ha⁻¹.

Propriétés physiques du sol

Les paramètres physiques du sol évalués une année après les apports organiques de la campagne précédente et après huit ans d'apport d'amendement sont significativement affectés par l'addition d'amendements organiques.

Néanmoins l'application à long terme (8 ans) d'amendement organique n'a pas beaucoup modifié la stabilité structurale du fait des faibles variations entre le sol témoin et les sols amendés. Ainsi, pour tous les traitements le sol est classé stable (*tableau 6*) bien que les parcelles amendées par le compost et par le fumier aient une stabilité structurale du sol légèrement meilleure.

La légère variation d'indice d'instabilité structurale entre les traitements peut être liée d'une part à la profondeur d'échantillonnage limitée aux 20 premiers centimètres du sol, ce qui cor-

Tableau 9 - Contenu en métaux lourds dans le sol après 7 ans d'application de fumier et de compost à différentes doses (40 et 80 t.ha⁻¹) (moyenne±écart type, n=4) Ben Achiba *et al.* (2010).**Table 9** - Heavy metals content in soil after a 7-year application of manure and compost at different rates (40 et 80 t.ha⁻¹) (mean±standard deviation, n = 4) Ben Achiba *et al.* (2010).

	ST8	SF40	SC40	SC80	Seuils Norme NF U44-041
Cu (mg kg ⁻¹)	42,8 ± 2,7 ^a	43,3 ± 7 ^a	60,3 ± 6,3 ^{bc}	67 ± 3,9 ^{cd}	100
Zn (mg kg ⁻¹)	88 ± 4 ^a	85 ± 2 ^a	121 ± 11 ^{ab}	135 ± 12 ^b	300
Pb (mg kg ⁻¹)	27,1 ± 2,3 ^a	28,7 ± 6,2 ^{ab}	38,3 ± 5,3 ^{ab}	50 ± 8,2 ^b	100
Cd (mg kg ⁻¹)	0,28 ± 0,03 ^a	0,27 ± 0,08 ^a	0,38 ± 0,04 ^a	0,4 ± 0,03 ^a	2
Ni (mg kg ⁻¹)	20,9 ± 0,3 ^c	20,1 ± 0,4 ^b	22 ± 0,4 ^d	21,4 ± 0,6 ^{cd}	50
Cr (mg kg ⁻¹)	51,5 ± 1,7 ^c	45,4 ± 1,6 ^a	54,3 ± 1,6 ^c	50,1 ± 1,4 ^{bc}	150

Dans chaque ligne les valeurs marquées par des lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$).

* Seuils Norme NF U44-041 (AFNOR, 1996).

respond à la zone d'enracinement où la stabilité des agrégats est plus grande que dans les autres parties du sol en raison de la rhizodéposition, la masse racinaire, la densité des racines, la distribution granulométrique, le renouvellement des racines, la longueur des racines, et la croissance des hyphes (Caravaca *et al.*, 2002). D'autre part elle peut être liée aux caractéristiques intrinsèques initiales du sol. Étant donné sa nature calcaire, le sol étudié présente une importante teneur d'ions Ca²⁺ qui, par leur pouvoir flocculant vis-à-vis des argiles et leur rôle stabilisant pour les composés organiques, contribuent à l'organisation de sa structure et à sa stabilité sans compter la forte teneur en argile (Bonneau et Souchier, 1979; Munneer et Oades, 1989). Plusieurs corrélations positives entre stabilité des agrégats et teneur en argile du sol sont aussi observées dans la bibliographie (Stengel *et al.*, 1984; Le Bissonnais *et al.*, 2002).

La stabilité de la structure du sol témoin, pourtant plus faible que celle des sols amendés, montre que seule la mise en culture à long terme du sol étudié peut générer la stabilité des agrégats: la restitution des résidus de récolte a permis en 8 ans d'augmenter la teneur en MO et donc la cohésion entre les particules minérales par la formation de complexes organo-minéraux. Ainsi, Bronick et Lal (2005) et Wei *et al.* (2006) ont rapporté que les résidus de plantes à travers des processus microbiens ainsi que les racines des plantes et les hyphes fongiques génèrent des composés organiques qui servent comme agents reliant les particules de sol en agrégats. De plus, (Busscher *et al.*, 2007) ont montré que la dégradation des résidus de blé dans le sol augmente l'agrégation du sol.

La stabilité de la structure mesurée dans le sol témoin a été améliorée par l'application d'amendements organiques ce qui rejoint les résultats trouvés par Alago et Yilmaz (2009), Chenu *et al.* (2000), Gurpreet *et al.* (2007), Tejada *et al.* (2009), Tejada

et Gonzalez (2007) et Singh *et al.* (2007). Cependant, l'intensité de cette amélioration est différente suivant les amendements (tableau 6), ce qui est en accord avec les résultats de Puget *et al.* (2000), Spaccini *et al.* (2004), et Tejada *et al.* (2006) qui ont constaté que la structure du sol dépend de la quantité et de la nature de la matière organique qui favorise les liaisons inter-particulaires. En effet, le compost appliqué à une dose de 80 t.ha⁻¹ a entraîné la diminution la plus prononcée de l'indice d'instabilité structurale ce qui est en accord avec les travaux de Tejada *et al.* (2009), Tejada et Gonzalez (2007) et Celik *et al.* (2004). Dans ce cas, le compost plus riche en acides humiques et fulviques et en cations polyvalents (Ca, Mg, Cu, Pb, Zn...) lorsqu'il a été appliqué à un taux élevé a fourni d'avantage ces éléments au sol ce qui a entraîné sa meilleure agrégation. Ainsi, les substances humiques (Fortun *et al.*, 1989) et spécialement les acides humiques (Piccolo et Mbagwu, 1990; Piccolo *et al.*, 1997 et Whalen *et al.*, 2003) sont reconnus pour leur efficacité dans l'augmentation de l'agrégation du sol, alors que Gu et Doner (1993) ont signalé que les substances humiques et spécialement les acides humiques n'affectent la stabilité des agrégats que s'il y a assez de cations polyvalents dans le sol.

Or, étant donné que l'indice d'instabilité structurale n'est pas corrélé significativement avec le C_{AH} dans cette étude (tableau 8), les cations Ca²⁺ et Mg²⁺ ainsi que les métaux lourds qui sont fortement présents dans le compost auront joué un rôle prépondérant dans la stabilité de la structure du sol dans le traitement SC80. Ces cations polyvalents lorsqu'ils sont apportés au sol, en quantité suffisante par le traitement SC80 ont agi en présence des substances humiques comme agents de liaison qui réunissent les particules de sol en micro-agrégats et qui correspondent dans ce cas aux complexes argile-cations polyvalents-matière organique. L'augmentation significative des

teneurs en métaux lourds notamment Cu, Zn et Pb dans le sol de la parcelle SC80 met en évidence l'amplitude de la formation de ces complexes par ce traitement. Comme les agents précédemment cités sont persistants dans les sols (Edwards et Bremner, 1967; Tisdall et Oades, 1982), les micro-agrégats formés sont donc stables, ce qui explique en partie la stabilité structurale du sol dans le traitement SC80. Armstrong et Tanton (1992) et Zhang et Norton (2002) ont mis en évidence l'efficacité des cations Ca^{2+} dans l'amélioration de la structure alors que Shuman (1999) a pu évaluer le rôle des amendements organiques riches en matière organique humifiée tel que le compost dans la stabilisation des complexes métaux lourds-substances humiques. Cependant étant donné que la macroporosité au niveau du traitement SC80 est plus élevée que celle des autres traitements, la stabilité structurale du sol serait due à la stabilité de micro-agrégats mais surtout à celle des macro-agrégats. La formation des macro-agrégats et leur stabilisation sont significativement liées à la teneur de $C_{<50\mu}$. La matière organique humifiée fortement ajoutée au sol par le compost d'ordures ménagères en contribuant à la fois comme revêtement des particules à travers des cations polyvalents puis comme liaison inter-particules (Tarchitzky *et al.*, 2000) et encore comme liaison inter-agrégats a donc incité l'augmentation de la stabilité des macro-agrégats; ceci suite à la diminution de leur mouillabilité et par conséquent à leur destruction à l'eau. L'eau percolée à travers un échantillon perturbé s'infiltrerait plus rapidement d'où l'augmentation prononcée du coefficient de perméabilité. Par ailleurs, Leon-Gonzalez *et al.* (2000); Caravaca *et al.* (2002) ont rapporté que les matériaux compostés peuvent augmenter la macro-agrégation et la stabilité des agrégats de la rhizosphère alors que Alagoz et Yilmaz (2009) ont montré que l'effet de substances humiques tel que K-humâtes appliquées à un sol argileux n'est significatif que pour les agrégats de 8-4 mm et à la dose la plus élevée.

Cet effet positif du traitement SC80 sur l'agrégation du sol est applicable au traitement SC40 et SF40 mais d'une façon moins prononcée étant donné que la quantité de matière organique humifiée et de cations polyvalents ajoutés au sol est plus faible. Toutefois, statistiquement, le traitement SF40 bien qu'il ait fourni moins de composés humiques au sol a diminué d'une manière similaire au traitement SC40 l'indice d'instabilité structurale. L'apport au sol de matière organique facilement biodégradable en plus de la matière organique stable par le fumier a donc incité d'avantage l'augmentation de l'activité biologique et par conséquent la libération des agents de liaison très efficaces pour la stabilité des agrégats. L'addition de fumier au sol est souvent associée à l'augmentation du taux de carbohydrates et polysaccharides de néo-synthèse microbienne et à l'amélioration de la structure du sol (Mishra et Sharma, 1997; Shepherd *et al.*, 2001; Debosz *et al.*, 2002). Six *et al.* (2004) ont montré que les liaisons organiques dues au fumier améliorent la macro-agrégation. De plus, Morari *et al.* (2006); Lugato *et al.* (2007); Gulde *et al.* (2008) et Lugato *et al.* (2010) ont trouvé que l'addition de fumier

à la surface du sol augmente significativement les proportions des macro-agrégats (250-2000 μ m). De même, l'ajout de fumier pendant 8 années successives à un sol argilo-limoneux cultivé par blé/soja en rotation annuelle et en climat sub-tempéré, a augmenté significativement le pourcentage de macro-agrégats supérieur à 1 mm dans l'horizon 0-45 cm (Bhattacharyya *et al.*, 2007). Néanmoins, dans notre expérience, l'addition de fumier à la surface du sol a été accompagnée par une macroporosité moins considérable que celles des deux autres amendements organiques. En fait, l'épandage de fumier améliore la structure du sol, augmente la macro-agrégation et la résistance à la battance mais peut diminuer la stabilité des agrégats du sol contre la dissolution et les actions de dispersion (Pare *et al.*, 1999; Whalen et Chang, 2002; Hao et Chang, 2002). En effet, après un an d'application, l'activité biologique ainsi que les exsudats microbiens diminuent à la surface du sol amendé par le fumier en raison de la diminution du pool de carbone organique labile. Par conséquent, les macro-agrégats formés perdent leur stabilité et éventuellement se détruisent en libérant des micro-agrégats stables d'où l'importance de la microporosité au niveau du traitement SF40 par rapport aux autres traitements organiques. Dans le sol amendé par 40 t.ha⁻¹ de compost, comme l'activité microbienne est plus importante que celle dans le sol ayant reçu une dose double, les processus d'agrégation se font comme cela a déjà été décrit dans le cas du fumier mais d'une manière moins prononcée étant donné que l'activité microbienne développée par ajout de fumier est plus importante que l'importance de l'apport de matière organique biodégradable.

En général, l'importance de la stabilité des agrégats dans les différents traitements y compris le témoin est majoritairement due à la forte cohésion interne des agrégats, ce qui se traduit par la prédominance des agrégats stables au prétraitement alcool (Aga) dans cette étude.

L'augmentation de la stabilité des agrégats dans les sols amendés est donc le résultat de l'augmentation de la cohésion inter-particulaire dans les agrégats d'autant plus importante avec le traitement SC80 qu'avec les traitements SC40 et SF40; en effet elle est due au renforcement des liaisons entre les particules formant l'agrégat sous l'action conjuguée de substances humiques et de cations polyvalents qui est plus durable que celle des agents stabilisants de néoformation microbienne (tel que polysaccharides et carbohydrates) dont la biodégradation est rapide (Chaney et Swift, 1986 et Six *et al.*, 2004).

L'effet positif des amendements organiques sur les différentes propriétés physiques est donc attribué à l'augmentation de la stabilité structurale du sol. La porosité totale dans les sols amendés a augmenté suite au réarrangement des particules du sol et à l'augmentation de l'agrégation. En effet, elle est positivement et significativement ($p < 0,0001$) corrélée à la macroporosité. La densité apparente diminue mais d'une manière plus significative avec l'addition d'une dose double de compost ce qui est en accord avec les travaux de Hemmat *et al.* (2010); Tejada *et al.*

(2006); Tejada *et al.* (2009); Aggelides et Londra (2000); Evanylo *et al.* (2008); Celik *et al.* (2004). D'un autre côté, l'amélioration de la stabilité de la structure du sol a été accompagnée par une nouvelle répartition de catégorie de pores qui s'est traduite par une diminution du pourcentage de micropores dont le résultat est la diminution des humidités volumiques à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, alors que la réserve utile en eau a augmenté avec l'ajout du compost mais d'une manière légèrement plus importante avec le taux le plus élevé ce qui était déjà montré par Aggelides et Londra (2000) et par Celik *et al.* (2004).

CONCLUSION

L'ajout des composts d'ordures ménagères et du fumier de ferme dans l'horizon de surface d'un sol argileux appartenant à la plaine de Mornag pendant huit années successives a amélioré ses propriétés physiques. Le $C_{<50\mu}$, la densité apparente, la porosité, la stabilité structurale ainsi que les capacités de rétention en eau ont été significativement affectés par le type d'amendement appliqué. La teneur en MO, en C_T et en C_{AH} a été augmentée par ces amendements mais à un degré non significatif. Cependant l'augmentation du contenu du sol en MO, C_T et $C_{<50\mu}$ a contribué significativement à l'augmentation de la porosité totale et du coefficient de perméabilité et d'une autre part à la diminution de l'indice d'instabilité structurale et de la densité apparente, alors que l'augmentation des teneurs de C_{AH} n'a pas affecté les paramètres étudiés. La restauration des propriétés physiques du sol étudié a été plus prononcée avec l'application d'une dose élevée de compost. Ainsi le compost plus riche en substances humiques mais surtout en cations polyvalents que le fumier lorsqu'il est appliqué à un taux élevé a augmenté la stabilité structurale du sol à travers la stabilisation des macro-agrégats; l'infiltration d'eau devient plus rapide et la réserve en eau facilement utilisable par les plantes augmente. Par conséquent le compost d'ordures ménagères stabilisé peut être utilisé d'une part comme une alternative à l'amendement par fumier en zone semi-aride mais aussi comme étant une pratique adéquate pour la restauration de la fertilité physique des sols argileux de plaine s'il est appliqué à des taux élevés.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Jean-Pierre Rossignol, agronomologue et maître de conférence honoraire à l'INHP (Institut National d'Horticulture et de Paysage à Angers, Bouchemaine) pour sa participation à la rédaction de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, 1996 - Qualité des sols. Recueil des normes françaises, 3^e éd. AFNOR, Paris-la Défense, p. 534.
- Aggelides S.M., Londra P.A., 2000 - Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresource Technology*. 71, 253-259.
- Alagoz Z., Yilmaz E., 2009 - Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey. *Soil and Tillage Research*. 103, 419 - 424.
- Armstrong A.S.B., Tanton T.W., 1992 - Gypsum applications to aggregated saline sodic clay topsoils. *J. Soil Sci.* 43, 249 - 260. *In*: Bronick C.J., Lal R., *Soil structure and management: a review*. *Geoderma*. 124, 3 - 22.
- Association Française pour l'Etude du Sol - AFES (2009). *Référentiel Pédologique 2008*. BAIZE, D. and GIRARD, C.M. Eds. Paris, Editions Quae: 432.
- Avnimelech Y., Cohen A., Shkedi D., 1990 - The effect of municipal solid waste compost on the fertility of clay soils. *Soil Technology*. 3, 275-284.
- Baize D., 1998 - Guide des analyses courantes en pédologie. INRA, Paris.
- Bastida F., Kandeler E., Moreno J.L., Ros M., Garcia C., Hernandez T., 2008 - Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. *Applied Soil Ecology*. 40, 318 - 329.
- Ben Achiba W., Gabteni N., Lakhdar A., Du Laing G., Verloo M., Jedidi N., Gallali T., (2009) - Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 130, 156 - 163.
- Ben Achiba W., Lakhdar A., Gabteni N., Du Laing G., Verloo M., Boeckx P., Cleemput O.V., Jedidi N., Gallali T., 2010 - Accumulation and fractionation of trace metals in a Tunisian calcareous soil amended with farmyard manure and municipal solid waste compost. *Journal of Hazardous Materials*. 176, 99 - 108.
- Bhattacharyya R., Chandra S., Singh R.D., Kundu S., Srivastva A.K., Gupta H.S. 2007 - Long-term farmyard manure application effects on properties of a silty clay loam soil under irrigated wheat - soybean rotation. *Soil and Tillage Research*. 94, 386 - 396.
- Bonneau J.M., Souchier B., 1979 - Constituants et propriétés du sol, Tome 2, Ed Masson, 459P.
- Bouzaiane O., Cherif H., Saidi N., Jedidi N., Hassen A., 2007 - Effects of municipal solid waste compost application on the microbial biomass of cultivated and non-cultivated soil in a semi-arid zone, *Waste Management Research* 25, 334 - 342.
- Bram G., Mariela F., Monica M., Julie M. N., Jozef D., Jorge D. E., Benjamin F-S., Ken D. S., 2007 - Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. *Soil and Tillage Research*. 94, 209 - 219.
- Bronick C.J., Lal R., 2005 - Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124, 3 - 22.
- Busscher W.J., Novak J.M., Caesar-Ton T., The Can, Sojka F R.E., 2007 - Amendments to increase aggregation in United States Southeastern Coastal Plain Soils. *Soil Sci.* 172 (8), 651 - 658. *In*: Alagoz Z., Yilmaz E.,

- Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey. *Soil and Tillage Research*. 103, 419 - 424.
- Caravaca F., Hernandez T., Garcia C., Roldan A., 2002 - Improvement of rhizosphere aggregate stability of afforested semiarid plant species subjected to mycorrhizal inoculation and compost addition. *Geoderma*. 108, 133 - 144.
- Celik I., Ortas I., Kilic S., 2004 - Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil and Tillage Research*. 78, 59 - 67.
- Chaney K., Swift R.S., 1986 - Studies on aggregate stability. II. The effect of humic substances on the stability of re-formed soil aggregates. *J. Soil Sci.* 37, 337-343.
- Chenu C., Le Bissonais Y., Arrouays D., 2000 - Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society American Journal*. 64, 1479 - 1486.
- Cherif H., Ayari F., Ouzari H., Marzorati M., Brusetti L., Jedidi N., Hassen A., Daffonchio D., 2009 - Effects of municipal solid waste compost, farmyard manure and chemical fertilizers on wheat growth, soil composition and soil bacterial characteristics under Tunisian arid climate. *European Journal of soil biology*. 45, 138 - 145.
- Clemente R., Escolar A., Pilar Bernal M., 2006 - Heavy metals fractionation and organic matter mineralization in contaminated calcareous soil amended with organic materials. *Bioresource Technology*. 97, 1894 - 1901.
- Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) - 1967 - Classification des sols. 96 p. Grignon, France.
- De Orellana J.A., Pilatti M.A., 1994 - La estabilidad de agregados como indicador edafico de sostenibilidad *in*: Gomez E., Ferreras L., Toresani S., Ausilio A., Bisaro V., Changes in some soil properties in a Vertic Argiudoll under short-term conservation tillage. *Soil and Tillage Research*. 61, 179 - 186.
- Debosz K., Vogensen L., Labouriau R., 2002 - Carbohydrates in hot water extracts of soil aggregates as influenced by long-term management. *In*: Bronick C.J., Lal R., *Soil structure and management: a review*. *Geoderma*. 124, 3 - 22.
- Dridi B., Toumi C., (1999) - Influence d'amendements organiques et d'apport de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. *Etude et Gestion des sols*, 6, 1, 7-14.
- Edwards A.P., Bremner J.M., 1967 - Microaggregates in soils. *Journal of Soil Science*. 18 (1), 64-73.
- Evanylo G., Sherony C., Spargo J., Starner D., Brosius M., Haering K., 2008 - Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 127, 50-58.
- Fabrizio A., Genevini P., Ricca G., Tambone F., Montoneri E., 2007 - Modification of soil humic matter after 4 years of compost application. *Waste Management*. 27, 319 - 324.
- Fabrizio A., Tambone F., Genevini P., 2009 - Effect of compost application rate on carbon degradation and retention in soils. *Waste Management*. 29, 174 - 179.
- Fernández JM., Hernández D., Plaza C., Polo A., 2007 - Organic matter in degraded agricultural soils amended with composted and thermally-dried sewage sludge. *Science of the Total Environment*. 378, 75 - 80.
- Fortun A., Fortun C., Ortega C., 1989 - Effect of farmyard manure and its humic fractions on the aggregate stability of a sandy-loam soil. *Journal of Soil Science*. 40, 293 - 298.
- García-Gil J.C., Plaza C., Soler-Rovira P., Polo A., 2000 - Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*. 32, 1907 - 1913.
- Giller K.E., Witter E., McGrath S.P., 1998 - Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review. *Soil Biol. Biochem.* 30, 1389 - 1414.
- Giusquiani P.L., Pagliai M., Gigliotti G., Businelli D., Benetti A., 1995 - Urban waste compost: effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. *Journal of Environmental Quality*. 24, 175 - 182.
- Gu B., Doner H.E., 1993 - Dispersion and aggregation of soils as influenced by organic and inorganic polymers. *Soil Science Society American Journal*. 57, 709 - 716.
- Gulde S., Chung H., Amelung W., Chang C., Six J., 2008. Soil Carbon Saturation Controls Labile and Stable Carbon Pool Dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 605-612.
- Gurpreet S., Jalota S.K., Yadvinder S., 2007 - Manuring and residue management effects on physical properties of a soil under the rice - wheat system in Punjab, India. *Soil and Tillage Research* 94, 229 - 238.
- Hamdi H., Jedidi N., Ayari F., M'hiri A., Hassen A., Ghrabi A., 2002 - The effect of Tunis' urban compost on soil properties, chemical composition of plant and yield. *In*: Proceedings of the International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management, Tunis (EPCOWM'2002), pp. 383 - 384.
- Hao X.Y., Chang C., 2002 - Effect of 25 annual cattle manure applications on soluble and exchangeable cations in soil. *Soil Sci.* 167, 126 - 134.
- 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*, Volume 123, Issues 1-3, January, Pages 1-14.
- Haynes R.J., Naidu R., 1998 - Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutr. Cycl. Agroecosys* 51, 123 - 137.
- Hemmat A., Aghilinategh N., Rezajnejad Y., Sadeghi M., 2010 - Long-term impacts of municipal solid waste compost, sewage sludge and farmyard manure application on organic carbon, bulk density and consistency limits of a calcareous soil in central Iran. *Soil and Tillage Research*. 108, 43 - 50.
- Hénin S., Monnier G., Combeau A., 1958 - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales agronomiques*, 9, 73-92.
- Iwegbue C.M.A., Emuh F.N., Isirimah N.O., Egun A.C., 2007 - Fractionation, characterization and speciation of heavy metals in composts and compost-amended soils. *Afr.J.Biotechnol.*6(2),67-78.
- Izaurrealde R.C., Rosenberg N.J., Lal R., 2001 - Mitigation of climatic change by soil carbon sequestration: issues of science, monitoring, and degraded lands. *In*: Fabrizio A., Tambone F., Genevini P., Effect of compost application rate on carbon degradation and retention in soils. *Waste Management*. 29, 174 - 179.
- Jedidi N., 1998 - Minéralisation et humification des amendements organiques dans un sol limono-argileux Tunisien. T.D. en Sciences Biologiques Appliquées. Université de Gand, Belgique, p. 180.
- Jedidi N., Hassen A., Ayari F., Benzarti S., Chérif H., Bouzine O., Mokni S., et Gharbi A., 2004 - Rapport d'avancement des travaux de recherche: Etude de compostage des déchets urbains dans la station de Béja. *Valorisation agronomique du compost*, 114 p.
- Kidd P.S., Dominguez Rodriguez M.J., Diez J., Monterroso C., 2007 - Bioavailability and plant accumulation of Heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long term application of sewage sludge. *Chemosphere*. 66, 1458 - 1467.
- Körschens M., Müller A., 1996. The static experiment Bad Lauchstädt, Germany. *In*: Fabrizio A., Tambone F., Genevini P., Effect of compost application rate on carbon degradation and retention in soils. *Waste Management*. 29, 174 - 179.
- Le Bissonnais Y., Cros-Cayot S., Gascuel-odoux C., 2002 - Topographic dependence of aggregate stability, overland flow and sediment transport. *Agronomie*. 22, 489-501.

- León-González F de., Hernández-Serrano M. M., Etchevers J. D., Payán-Zelaya F., Ordaz-Chaparro V., 2000 - Short-term compost effect on macroaggregation in a sandy soil under low rainfall in the valley of Mexico. *Soil and Tillage Research*. 56, 213-217.
- Lugato E., Paustian K., Giardini L., 2007 - Modelling soil organic carbon dynamics in two management practices (RMPs) on soil carbon evolution and sequestration in North-eastern Italy. *Soil Use Management*. 22, 71 - 81.
- Lugato E., Simonetti G., Morari F., Nardi S., Berti A., Giardini L., 2010 - Distribution of organic and humic carbon in wet-sieved aggregates of different soils under long-term fertilization experiment. *Geoderma*. 157, 80 - 85.
- Mathieu C., Pielain F., 1998 - Analyse physique des sols, Méthodes choisies. Lavoisier, Techniques et documentation, Paris. 275 p
- Ming-Kui Z., Li-ping F., 2007 - Effect of tillage, fertilizer and green manure cropping on soil quality at an abandoned brick making site. *Soil and Tillage Research*. 93, 87 - 93.
- Mishra V.K., Sharma R.B., 1997 - Percolation and evapotranspiration rates of rice field as influenced by integrated nutrient management. *In*: Bhattacharyya R., Chandra S., Singh R.D., Kundu S., Srivastva A.K., Gupta H.S., Long-term farmyard manure application effects on properties of a silty clay loam soil under irrigated wheat - soybean rotation. *Soil and Tillage Research*. 94, 386 - 396.
- Monnier G., 1994 - Assemblage et organisation physique des particules. *In*: Bonneau M., Souchier B., *Pedologie*. 2, constituants et propriétés du sol. 2^e édition. Masson, Paris Madrid Barcelone. 665p
- Morari F., Lugato E., Berti A., Giardini L., 2006 - Long-term effects of recommended management practices (RMPs) on soil carbon evolution and sequestration in North-eastern Italy. *Soil Use Management*. 22, 71 - 81.
- Munneer M., Oades J.M., 1989 - The role of VAM-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models. *Aust. J. soil. Res.* 27, 411-423.
- Musy A., Soutter M., 1991 - *Physique du sol*. 1^{re} édition. Presses polytechniques et universités romandes, CH-Lausanne, 335p.
- Pagliai M., Antisari V.L., 1993 - Influence of waste organic matter on soil micro and macrostructure. *Bioresource Technology*. 43, 205-213.
- Pare T., Dinel H., Moulin A.P., Townley-Smith L., 1999 - Organic matter quality and structural stability of a Black Chernozemic soil under different manure and tillage practices. *Geoderma* 91, 311 - 326.
- Piccolo A., Mbagwu J.S.C., 1990 - Effects of different organic wastes amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances. *Plant Soil*. 123, 27 - 37.
- Piccolo A., Pietramellara G., Mbagwu, J.S.C., 1997 - Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability. *Geoderma*. 75, 267 - 277.
- Puget P., Chenu C., Balaesdent J., 2000 - Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *In*: Tejada M., Hernandez M.T., Garcia C., Soil restoration using composted plant residues: Effects on soil properties. *Soil and Tillage Research* 102, 109 - 117.
- Qiao X.L., Luo Y.M., Christie P., Wong M.H., 2003 - Chemical speciation and extractability of Zn, Cu and Cd in Two contrasting biosolids-amended clay soils. *Chemosphere*. 50, 823 - 829.
- Schnitzer M., Khan S., 1972 - Humic substances in the environment ed Marcel DEKKER INA New York
- Shepherd T.G., Saggar S., Newman R.H., Ross C.W., Dando J.L., 2001 - Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. *In*: Bronick C.J., Lal R., Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124, 3 - 22.
- Shuman L.M., 1999 - Organic waste amendments effect on zinc fractions of two soils. *J. Environ. Qual.* 28, 1442-1447.
- Singh G., Jalota S.K., Singh Y., 2007 - Manuring and residue management effects on physical properties of a soil under the rice - wheat system in Punjab, India. *Soil and Tillage Research*. 94, 229 - 238.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K., 2004 - A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*. 79, 7-31.
- Smith P., Powlson D.S., Smith J.U., Falloon P., Coleman K., 2000 - Meeting Europe's climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biology*. 6, 525 - 539.
- Soudi B., Chiang C.N., Sitou M., Hachouma S.A. et Sbai A., 1992 - Evaluation de la valeur fertilisante azotée des fumiers de ferme et des composts industriels. *Actes Inst. Agron. Vet. (Maroc) Vol 12 (3)*: 29-38.
- Spaccini R., Mbagwu J.S.C., Igwe C.A., Conte P., Piccolo A., 2004 - Carbohydrates and aggregation in lowland soils of Nigeria as influenced by organic inputs. *Soil and Tillage Research*. 75, 161 - 172.
- Stengel P., Douglas J.T., Guerif J., Goss M.J., Monnier G., Cannell R.O., 1984 - Factors influencing the variation of some properties of soil in relation to their suitability for direct-drilling. *Soil and Tillage Research*. 7, 279-288.
- Tejada M., Garcia C., Gonzalez J.L., Hernandez M.T., 2006 - Organic amendment based on fresh and composted beet vinasse: influence on physical, chemical and biological properties and wheat yield. *In*: Tejada M., Hernandez M.T., Garcia C., Soil restoration using composted plant residues: Effects on soil properties. *Soil and Tillage Research*. 102, 109 - 117.
- Tejada M., Gonzalez J.L., 2007 - Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain. *Soil and Tillage Research* 93, 197 - 205.
- Tejada M., Hernandez M.T., Garcia C., 2009 - Soil restoration using composted plant residues: Effects on soil properties. *Soil and Tillage Research*. 102, 109 - 117.
- Tisdall J.M., Oades J.M., 1982 - Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil. Sci.* 33, 141-163.
- Whalen J.K., Chang C., 2002 - Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1637 - 1647.
- Warman P.R., Rodd A.V., Hicklenton P., 2009 - The effect of MSW compost and fertilizer on extractable soil elements and the growth of winter squash in Nova Scotia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 133, 98 - 102.
- Wei C., Gao M., Shao J., Xie D., Genxing P., 2006 - Soil aggregate and its response to land management practices. *China Particuology*. 4, 5, 211-219.
- Whalen J.K., Hu Q., Liu A., 2003 - Compost application increase water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society American Journal*. 67, 1842 - 1847.
- Yaduvanshi N.P.S., 2001 - Effect of five years of rice - wheat cropping and NPK fertilizer use with and without organic and green manures on soil properties and crop yields in a reclaimed sodic soil. *Jornal Indian Society Soil Science*. 49, 714 - 719.
- Zhang X.C., Norton L.D., 2002 - Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. *In*: Bronick C.J., Lal R., Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124, 3 -22.

