Effet à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol

Alexandra Maltas[1], Hansrudolf Oberholzer[2], Raphaël Charles[1], Vincent Bovet[1] et Sokrat Sinaj[1]
[1]Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW, 1260 Nyon
[2]Station de recherche Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zurich
Renseignements: Sokrat Sinaj, e-mail: sokrat.sinaj@acw.admin.ch, tél. + 41 22 363 46 58

Epandage d'engrais azoté minéral. (Photo: ACW)

Introduction

L'accès facilité aux engrais de synthèse et la spécialisation des exploitations agricoles conduit à une diminution spectaculaire de l'utilisation des engrais de ferme dans les exploitations sans bétail. Or, la suppression de ces apports organiques occasionne des diminutions importantes de la matière organique des sols (MO) lorsqu'aucune mesure de substitution n'est prise (Maltas *et al*. 2011; Vullioud *et al*. 2006). Les mesures habituellement proposées font appel à la restitution des pailles, à l'insertion d'engrais vert pendant l'interculture et à la réduction du travail du sol. Ces techniques sont connues pour leurs impacts positifs sur le stockage de la MO dans les sols agricoles (Lal 2009; Maltas *et al.* 2011) et l'évaluation de leur efficacité dans les conditions suisses doit être poursuivie sur le long terme. A cette fin, la comparaison de différents engrais organiques (engrais vert, pailles de céréales et engrais de ferme) et chimiques est réalisée depuis 1976 à Changins (VD). Vullioud *et al.* (2006) ont étudié l'impact de ces engrais sur le stockage de la matière organique, les performances des cultures et les bilans des éléments fertilisants après 29 années d'essai. La présente étude complète ce travail en analysant plus particulièrement les effets de ces engrais sur (i) les propriétés organiques du sol après 34 années d'essai et apporte des éléments nouveaux sur (ii) les propriétés biologiques et chimiques du sol.

Matériel et méthodes

Descriptif de l'essai

L'essai est situé à Changins (VD, 430 m, 970 mm de précipitations et 9,5 °C en moyenne annuelle) sur un sol brun lessivé d'une profondeur utile de 70 à 100 cm contenant 14 % d'argile et 39 % de silt. Il a débuté en 1976. Le sol présentait alors une teneur en MO de 2,0 % et un pH-H_2O de 7,2. Les teneurs en phosphore (P) et potassium (K) extractibles à l'eau saturée en CO_2 étaient respectivement de 4,35 et 23,24 mg kg^{-1}. La teneur en magnésium (Mg) extractible au $CaCl_2$ (Mg-$CaCl_2$) était de 20,00 mg kg^{-1}.

Le dispositif expérimental est un split-plot comportant six procédés et quatre sous-procédés avec quatre répétitions. Les procédés varient par la nature des engrais organiques apportés et les sous-procédés par la dose d'azote minérale épandue (tabl. 1 et 2). Les 96 parcelles unitaires mesurent chacune 90 m².

Les rotations font alterner cultures de printemps et d'automne et permettent ainsi l'insertion d'un engrais vert une année sur deux. D'une durée de 5 à 6 ans, elles comprennent 60 à 70 % de céréales et comportent du colza et du maïs.

Les pailles de maïs et de colza sont broyées, puis enfouies dans le sol. Les pailles de céréales sont exportées, sauf dans le procédé «Pailles» où ces dernières sont restituées au sol. Les engrais de ferme (fumier et lisier) sont appliqués tous les 3 ans, sur maïs et colza, sauf entre 1976 et 1993 où le lisier est apporté chaque année. Le travail du sol est effectué à la charrue (20–25 cm) juste avant le semis.

Les apports en P et K, optimaux sur l'ensemble des traitements, sont basés sur les recommandations en vigueur, en tenant compte de la valeur fertilisante des restitutions de pailles et des arrière-effets du fumier et du lisier, toutefois sans procéder aux corrections pour la fertilité du sol (Ryser *et al.* 1987).

Mesures et analyses statistiques

La biomasse aérienne des engrais verts est quantifiée en 1988, 1990, 1992 et 1996 (tabl. 3). La biomasse des pailles de céréales ainsi que ses teneurs en N, P, K, calcium (Ca) et magnésium (Mg) sont suivies en 1993, 1998, 2004, 2006, 2007 et 2009 (tabl. 3). Les teneurs totales en matière sèche (MS), N, P, K, Ca et Mg du fumier et du lisier sont déterminées tous les ans avant leur épandage (tabl. 3).

Les propriétés biologiques du sol sont analysées en 1999 selon les méthodes des stations de recherche ART et ACW (2001). Les échantillons de sol sont prélevés à la sortie de l'hiver. Les sols incubés n'ont reçu aucun engrais de ferme et engrais vert. Seules les pailles de la culture précédente (avoine) ont été incorporées à l'automne dans le procédé «Pailles».

La teneur en MO dans les vingt premiers centimètres de sol est suivie dans le sous-procédé C (fumure N proche de la dose optimale) en 1987, 1993, 1999 et 2007. Les prélèvements de sol sont toujours effectués après la récolte d'une céréale. En 2009, une caractérisation plus fine des propriétés organiques et chimiques du sol est effectuée (tabl. 4). L'horizon 0–20 cm est alors analysé sur tous les procédés et sous-procédés. ›

Résumé

Les conséquences de l'utilisation de différents engrais organiques (engrais-vert, pailles de céréales, 35 et 70 t ha^{-1} de fumier tous les 3 ans et 60 m^3 ha^{-1} de lisier tous les 3 ans) et chimiques (quatre doses d'azote) sont testées à Changins depuis 1976. Cette étude analyse leurs effets à long terme sur les propriétés organiques, chimiques et biologiques du sol. Après 34 ans d'essai, lorsque les cultures reçoivent une fertilisation azotée optimale, la teneur en matière organique diminue de 0,50 g/100 g de terre pour le procédé «engrais minéraux», de 0,20 g/100 g pour «engraisvert» et «pailles» et de 0,18 g/100 g pour «fumier 35 t ha^{-1} tous les 3 ans» et «lisier 60 m^3 ha^{-1} tous les 3 ans». Seul le procédé «fumier 70 t ha^{-1} tous les 3 ans» montre une augmentation de la teneur du sol de 0,15 g/100 g. Les engrais organiques n'affectent pas significativement les principales propriétés chimiques du sol, hormis les teneurs en éléments traces. Les procédés recevant du fumier et du lisier présentent des teneurs en cuivre, fer, zinc et manganèse extractibles à l'acétate ammonium EDTA plus importantes que le témoin «Engrais minéraux». Les engrais organiques ont également un effet significatif positif sur l'activité et la biomasse microbienne et semblent modifier la composition de cette dernière.

Tableau 1 | Description des procédés et des sous-procédés

Procédés	Engrais organiques			Sous-procédés	Fertilisation N
	Pailles	Engrais de ferme	Engrais vert		
Emin	Céréales exportées	Non	Non	**A**	Témoin sans N
				B	Sous-fertilisation
EV	Céréales exportées	Non	Moutarde tous les 2 ans avant culture de printemps	**C**	Proche de la dose optimale
Pailles	Aucune paille exportée	Non	Non	**D**	Sur-fertilisation
Fu35	Céréales exportées	35 t ha^{-1} Fumier† tous les 3 ans	Non		
Fu70	Céréales exportées	70 t ha^{-1} Fumier† tous les 3 ans	Non		
Li60	Céréales exportées	60 m^3 ha^{-1} Lisier‡ tous les ans de1976–1993, puis tous les 3ans	Non		

†: fumier au tas de vache laitière, épandu sur sol nu et enfoui par le labour.
‡: lisier de vache laitière dilué, épandu sur sol couvert par la culture. L'eau de dilution est apportée par les eaux de lavage, ce qui équivaut à une dilution 1/1.

Tableau 2 | Fertilisation azotée chimique† (kg/ha)

Procédés	1976–1993												1994–2002 et 2005								2003–2004				2006–2010			
	orge, avoine				blé				maïs, colza				orge, avoine				blé, maïs, colza				colza		blé		toutes cultures			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B	C	D
Emin	0	35	70	105	0	70	110	150	0	100	150	200	0	35	70	105	0	70	110	150	0	40	0	30	0	Norme-40	Norme††	Norme+40
EV																												
Pailles																												
Fu35					0	30	70	110	0	50	100	150																
Fu70																												
Li60																												

† : Nitrate d'ammonium épandu sur culture en deux ou trois apports.
†† : Selon la méthode des normes corrigées (Ryser *et al.* 1987).

Quatre modèles de bilan humique sont testés. Les modèles suisses, SALCA (Neyroud *et al.* 1997; Oberholzer *et al.* 2006) et VDLUFA (Vdlufa 2004), le modèle allemand HUMOD (Brock *et al.* 2009) et le modèle français SIMEOS-AMG développé par Agro-Transfert Ressources et Territoires et l'INRA de Laon (Saffih-Hdadi *et al*. 2008). Les stocks de carbone (C) sur 0–25 cm en 2009 sont simulés à l'aide des quatre modèles et comparés avec les stocks observés. Compte tenu de la profondeur de labour, la teneur en C mesurée sur 0–20 cm est considérée égale à celle sur 0–25 cm.

Les analyses statistiques sont réalisées en utilisant le logiciel XLSTAT 2010, Copyright Addinsoft 1995–2009, et le test de Fisher est appliqué pour comparer les moyennes des procédés et sous-procédés.

Résultats et discussion

Evolution de la teneur en MO et bilans humiques

Les prélèvements de sol pour l'analyse de la teneur en MO ont toujours été réalisés à la même période. Malgré cette précaution, la variabilité interannuelle sur cette mesure est grande (fig. 1). Il est donc recommandé de suivre la teneur en MO sur plusieurs dates avant de conclure à une évolution à long terme de la MO dans le sol.

Lorsque les cultures reçoivent une fertilisation N optimale (sous-procédé C), la teneur en MO de tous les procédés, à l'exception de Fu70, diminue par rapport à la teneur observée en 1975 (fig. 1). Dans le procédé Li60, la teneur en MO commence à diminuer après 1993. C'est aussi à partir de ce moment que le lisier n'est plus

Tableau 3 | Matière sèche et macroéléments apportés lors de l'incorporation des différents apports organiques: engrais verts, pailles de céréales, fumier et lisier. Les valeurs représentent les moyennes des valeurs disponibles sur la période 1975–2009. Les valeurs entre parenthèses représentent les écart-types des moyennes annuelles

Apports organiques	Matière sèche	N total	N-NH4	P total	K total	Ca total	Mg total
	dt ha^{-1}	kg ha^{-1}					
Engrais vert[1]	27 (6)	-	-	-	-	-	-
Pailles de blé[2]	44 (3)	14 (4)	-	3 (1)	45 (9)	11 (2)	2 (0,4)
Pailles d'avoine[2]	36 (6)	13 (4)	-	4 (2)	113 (33)	12 (1)	2 (1)
Fumier- 35 t de matière fraîche ha^{-1}	71 (12)	192 (47)	20 (15)	52 (19)	227 (133)	169 (43)	34 (7)
Fumier- 70 t de matière fraîche ha^{-1}	142 (24)	384 (94)	40 (30)	105 (39)	454 (39)	337 (86)	67 (13)
Lisier3 - 60m^3 ha^{-1}	20 (10)	101 (28)	54 (22)	19 (9)	171 (58)	52 (22)	12 (5)

[1]: biomasse aérienne totale récoltée dans le sous-procédé C du procédé EV.
[2]: échantillons récoltés dans le sous-procédé C du procédé «Pailles».
[3]: lisier dilué avec les eaux de lavage (dilution 1/1). Analyses effectuées selon les méthodes de référence des stations de recherche Agroscope (Stations de recherche ART& ACW 2011).

Tableau 4 | Effet des procédés et des sous-procédés sur la fertilité du sol en 2009

	A													B		C		D	
Analyses†	**Emin**		**EV**		**Pailles**		**Fu35**		**Fu70**		**Li60**		**Moyenne**	**Moyenne**		**Moyenne**		**Moyenne**	
Propriétés chimiques																			
MO (g/100g)	1,35	c	1,70	ab	1,65	bc	1,73	ab	2,00	a	1,75	ab	1,70	B	**1,78**	**AB**	**1,82**	**A**	**1,83**	**A**
N total (g/100g)	0,115	b	0,135	ab	0,125	ab	0,128	ab	0,143	a	0,135	ab	0,130	A	**0,135**	**A**	**0,138**	**A**	**0,138**	**A**
Rapport C/N	6,85	c	7,30	bc	7,61	abc	7,85	ab	8,14	a	7,51	abc	7,54	A	**7,66**	**A**	**7,70**	**A**	**7,68**	**A**
CEC (meq)	8,75	a	9,88	a	9,55	a	9,78	a	9,83	a	9,53	a	9,55	A	**9,78**	**A**	**9,53**	**A**	**9,68**	**A**
pH-H_2O	7,05	a	7,10	a	7,25	a	7,05	a	7,23	a	7,10	a	7,13	A	**7,06**	**A**	**7,05**	**A**	**7,03**	**A**
Phosphore du sol (mg kg^{-1})																			
P total†	764,8	a	817,0	a	760,1	a	740,7	a	765,7	a	745,4	a	765,6	A	**747,6**	**A**	**737,6**	**A**	**732,2**	**A**
P organique†	249,3	a	255,5	a	257,6	a	239,6	a	270,7	a	266,4	a	256,5	A	**265,1**	**A**	**268,0**	**A**	**264,3**	**A**
P-AAE	98,15	a	103,93	a	115,35	a	92,73	a	104,48	a	97,20	a	101,97	A	**91,27**	**AB**	**81,69**	**B**	**81,50**	**B**
Cations du sol (mg kg^{-1})																			
K-AAE	150,4	a	162,5	a	141,2	a	145,2	a	159,9	a	159,3	a	153,1	A	**137,1**	**B**	**135,2**	**B**	**131,1**	**B**
Mg-AAE	79,28	a	86,83	a	76,78	a	86,05	a	108,08	a	85,15	a	87,03	A	**81,68**	**A**	**84,17**	**A**	**84,99**	**A**
Ca-AAE	3202	a	4756	a	2265	a	3402	a	5810	a	2124	a	3593	A	**2641**	**A**	**3099**	**A**	**3390**	**A**
Métaux traces (mg kg^{-1})																			
Cu -AAE[2]	6,1	a	6,4	a	6,4	a	6,5	a	6,7	a	7,0	a	6,5	A	**6,9**	**A**	**6,8**	**A**	**6,5**	**A**
Fe -AAE[2]	286,5	b	298,0	ab	327,0	ab	315,5	ab	347,8	ab	374,5	a	324,9	A	**314,5**	**AB**	**269,3**	**B**	**301,9**	**AB**
Zn -AAE[2]	1,7	c	1,8	c	2,0	c	2,3	bc	3,2	a	2,7	ab	2,3	A	**2,2**	**A**	**2,3**	**A**	**2,3**	**A**
Mn-AAE[2]	296,0	a	318,3	a	310,3	a	305,0	a	325,3	a	329,8	a	314,1	A	**313,5**	**A**	**304,9**	**A**	**308,6**	**A**

†: les analyses P total et organique sont réalisées selon la méthode de Saunders et Williams (1955); toutes les autres analyses sont effectuées selon les méthodes de référence des stations de recherche Agroscope (Stations de recherche ART et ACW 2011). Les lettres majuscules différentes au sein d'une même ligne indiquent des moyennes significativement différentes entre sous-procédés au seuil de 5 % selon le test de Fisher. Les lettres minuscules différentes au sein d'une même ligne indiquent des moyennes significativement différentes entre procédés au seuil de 5 % selon le test de Fisher.

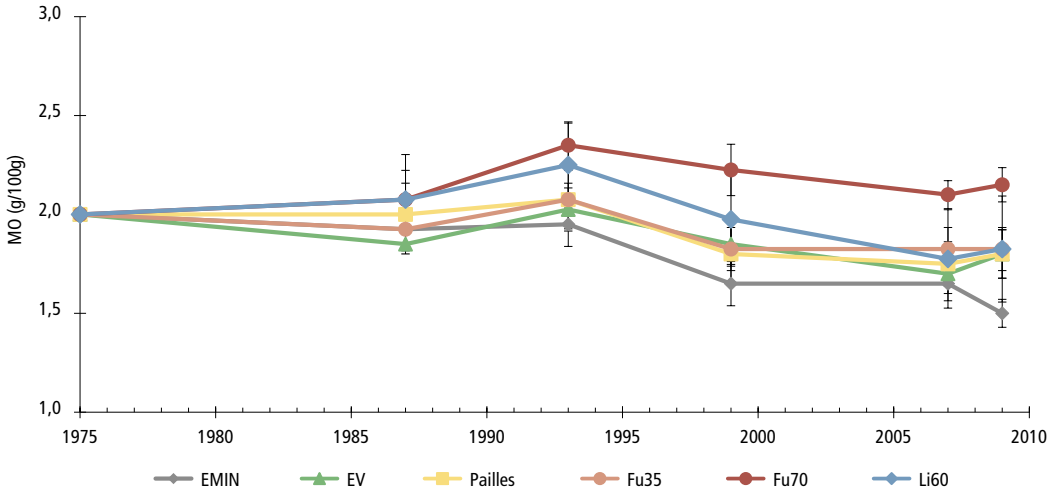

Figure 1 | Effet des procédés sur l'évolution de la teneur en MO sur les 20 premiers centimètres (sous-procédé C). Les barres verticales représentent l'écart-type.

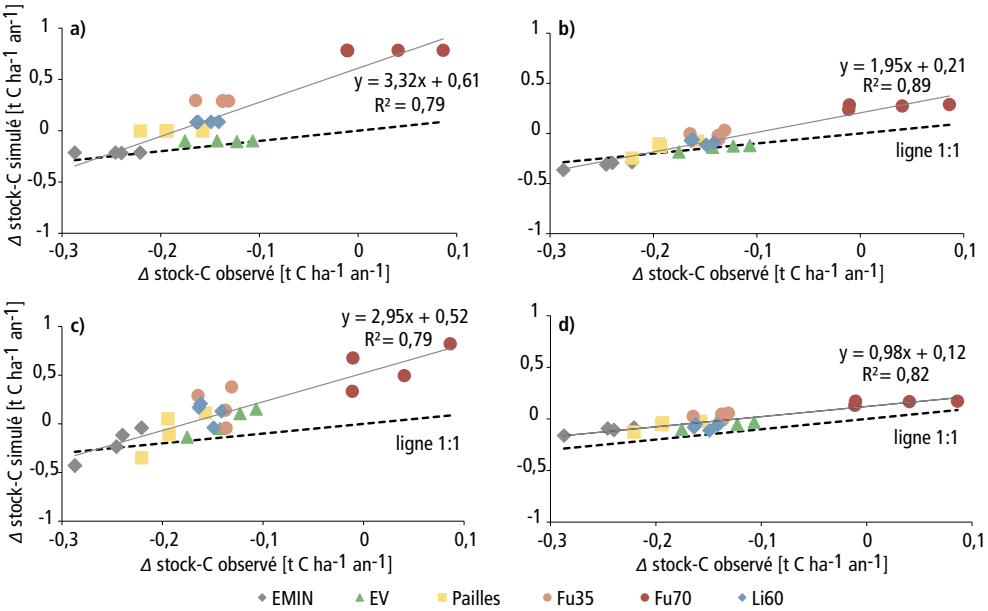

Figure 2 | Variations annuelles moyennes du stock de C sur 0–25 cm entre 1975 et 2009 observées (axe x) et simulées (axe y) par le modèle a) SALCA, b) VDLUFA, c) HUMOD et d) SIMEOS-AMG. Les quatre points pour un même procédé correspondent aux sous-procédés de fertilisation azotée.

épandu tous les ans mais tous les 3 ans. Les baisses de MO observées entre 1975 et 2009 dans les procédés EV, «Pailles» et Fu35 atteignent respectivement -0,20, -0,20 et -0,18 g/100 g de terre (fig. 1). L'insertion de moutarde tous les 2 ans (procédé EV) et la restitution des pailles de céréales (procédé «Pailles») présentent donc le même effet sur l'évolution de la teneur en MO dans le sol que 35 t ha^{-1} de fumier apporté tous les 3 ans (procédé Fu35). Dans cet essai, ces trois types d'engrais organiques ne suffisent pas à conserver la MO dans le sol. Le fort déstockage de MO observé provient vraisemblablement de pertes importantes de MO par minéralisation et/ou érosion dans ces systèmes avec labour. Sur un essai voisin, Maltas *et al.* (2011) ont également montré que lorsque les pailles de céréales sont exportées, l'apport de 12 t ha^{-1} an^{-1} de fumier ne permettait pas d'entretenir le stock de MO dans un sol labouré. Par contre, ces auteurs ont observé que la même dose apportée dans un sol travaillé de manière superficielle permettait un stockage de MO dans le sol.

Les variations de stocks de C (*Δ* stock-C) simulées par SALCA, VDLUFA, HUMOD et SIMEOS-AMG sont bien corrélées aux données observées (r^2 respectivement de 0,79, 0,89, 0,79 et 0,82, fig. 2). Les quatre modèles de bilan humique permettent donc une bonne comparaison de nos procédés entre eux. SIMEOS-AMG est le modèle qui simule le mieux l'effet absolu des engrais organiques (droite de régression proche de la ligne en trait tillé 1:1, fig. 2d). Les engrais de ferme utilisés dans cet essai (notamment le fumier) sont plus pauvres en C que ceux paramétrés dans les quatre modèles. SALCA, VDLUFA et HUMOD surestiment ainsi l'effet des engrais de ferme. Afin de contourner ce problème, la dose d'engrais de ferme renseignée dans SIMEOS-AMG a été ajustée de manière à obtenir la quantité de C réellement apportée par les engrais de ferme de cet essai. L'enrichissement du sol en C dû aux engrais organiques est alors bien simulé (fig. 2d). SIMEOS-AMG surestime aussi légèrement les variations de stocks de C, mais l'erreur est comparable pour les six procédés (droite de régression parallèle à la ligne 1:1). L'erreur du modèle provient vraisemblablement d'une sous-estimation de la minéralisation de la MO du sol ou d'une surestimation des apports de C par les racines des cultures. En 2009, l'effet de la fertilisation N (effet des sous-procédés) sur le stock de C, bien que faible, est positif (tabl. 4). VDLUFA (excepté dans le procédé Fu70) et SIMEOS-AMG sont les modèles qui retranscrivent le mieux cet effet (fig. 2). SALCA ne simule aucun effet de la fertilisation N alors que HUMOD le surestime (Holenstein 2009).

Propriétés organiques et chimiques du sol

Les résultats du tableau 4 mettent en évidence les effets des engrais organiques et des doses d'azote sur les propriétés organiques et chimiques du sol observées en 2009, soit 34 ans après le début de l'essai. Aucune interaction significative n'a été observée entre procédés et sous-procédés, hormis sur le rapport C/N.

Tableau 5 | Effet des procédés et des sous-procédés sur les propriétés biologiques du sol en 1999

	Moyenne						A	B	C	D
Analyses†	**Emin**	**EV**	**Pailles**	**Fu35**	**Fu70**	**Li60**	**Moyenne**	**Moyenne**	**Moyenne**	**Moyenne**
Biomasse microbienne										
C microbien (ppm)	316 d	331 cd	346 bcd	353 abc	368 ab	379 a	**341 A**	**349 A**	**342 A**	**363 A**
N microbien (ppm)	47,6 d	50,8 cd	54,8 bc	57,1 ab	59,7 ab	62,3 a	**53,4 A**	**55,0 A**	**54,9 A**	**58,2 A**
Rapport C/N	6,6 a	6,5 a	6,3 a	6,2 a	6,2 a	6,1 a	**6,4 A**	**6,4 A**	**6,3 A**	**6,3 A**
Activité microbienne										
C minéralisé (mg C-CO_2 kg terre^{-1} h^{-1})	0,26 d	0,27 cd	0,30 bcd	0,33 bc	0,35 b	0,43 a	**0,31 A**	**0,32 A**	**0,35 A**	**0,32 A**
N minéralisé (mg N-NO_3 kg terre^{-1} d^{-1})	0,55 c	0,54 c	0,59 bc	0,60 bc	0,61 b	0,68 a	**0,57 A**	**0,60 A**	**0,62 A**	**0,60 A**
qCO_2 (mg C-CO_2 g^{-1} C-mic h^{-1})	0,85 b	0,83 b	0,87 b	0,95 ab	0,96 ab	1,14 a	**0,91 A**	**0,92 A**	**1,02 A**	**0,88 A**

Les lettres majuscules différentes au sein d'une même ligne indiquent des moyennes significativement différentes entre sous-procédés au seuil de 5 % selon le test de Fisher. Pour un procédé donné, les répétitions correspondent aux valeurs de ce procédé dans les 4 sous-procédés.
Les lettres minuscules différentes au sein d'une même ligne indiquent des moyennes significativement différentes entre procédés au seuil de 5 % selon le test de Fisher. Pour un sous-procédé donné, les répétitions correspondent aux valeurs de ce sous-procédé dans les 6 procédés.

Effet des engrais organiques

Les teneurs en MO mesurées en 2009 dans le sous-procédé A (sans azote minéral) diffèrent significativement d'un procédé à l'autre. Comme précédemment observé dans le sous-procédé C (fig. 1), la teneur en MO est plus élevée dans les procédés recevant des engrais organiques que dans le témoin Emin. L'effet des engrais organiques sur la teneur en N total est similaire à celui observé sur la teneur en MO. La composition de la MO du sol semble également affectée par les engrais organiques. En effet, le rapport C/N des procédés recevant des engrais organiques est supérieur à celui du témoin Emin (tabl. 4). Yang *et al.* (2007) ont observé un résultat comparable. Une élévation du rapport C/N de la MO du sol révèle une plus grande proportion de MO fraîche partiellement décomposée.

Bien que, la capacité d'échange cationique (CEC) soit positivement corrélée avec la teneur en MO (R=0,61), les procédés, appliqués durant 34 ans, n'influencent pas significativement la CEC (P>0,05; tabl. 4). Les teneurs en MO ne sont probablement pas encore suffisamment contrastées pour cela. Le pH-H_2O n'est également pas significativement affecté par les procédés. La nitrification de l'azote ammoniacale (N-NH_4), présent en quantité importante dans les engrais de ferme (tabl. 3), libère des protons, mais les bases échangeables (K, Ca, Mg) apportées par les engrais de ferme (tabl. 3) ont probablement neutralisé cette acidité. L'absence d'acidification du sol en présence d'engrais de ferme a été également rapportée par Maltas *et al.* (2011).

Par ailleurs, bien que les engrais organiques de cet essai (EV, Pailles, Fu35, Fu70 et Li60) enrichissent le sol en MO par rapport au témoin, les teneurs en P organique mesurées en 2009 ne diffèrent pas significativement entre procédés (tabl. 4). En effet, le P contenu dans les résidus de culture et les engrais ferme est rapidement minéralisé et peut être comptabilisé comme du P inorganique (Fardeau 2000).

La valeur fertilisante en P et en K des engrais organiques a été prise en compte dans le calcul de la fertilisation. Il est donc cohérent d'observer des teneurs en P et K extractibles à l'acétate ammonium EDTA (AAE) comparables dans les six procédés en 2009 (P>0,05; tabl. 4). Ce n'est par contre pas le cas de la fertilisation magnésienne. Les apports chimiques de Mg sont identiques sur tous les procédés (35 kg ha^{-1} en 1997 et 2008) malgré des apports de Mg par le fumier et le lisier non négligeables (35, 70 et 12 kg ha^{-1} en moyenne par apport respectivement dans Fu35, Fu70 et Li60; tabl. 3). Ces apports supplémentaires de Mg par les engrais de ferme tendent à expliquer la plus haute teneur en Mg-AAE observée dans le procédé Fu70, bien que l'écart soit non significatif (tabl. 4).

Les engrais de ferme apportent généralement des éléments traces en raison de l'ajout de ces derniers dans l'alimentation du bétail comme pro-biotiques (Li *et al.* 2010). Li *et al.* (2010) relèvent ainsi que l'application de fumier accroît significativement les quantités dans le sol d'éléments traces extractibles au DTPA (acide diéthylènetriaminepentaacétique). Dans cet essai, les quantités ›

d'éléments traces contenus dans les engrais de ferme n'ont pas été mesurées mais sont supposées non négligeables puisque des résultats similaires à ceux de Li *et al.* (2010) sont observés: fumier et lisier enrichissent significativement le sol en zinc (Zn) et fer (Fe) extractibles à l'AAE et tendent à enrichir le sol en cuivre (Cu) et manganèse (Mn; tabl. 4). Les éléments traces, en tant que micronutriments à faible concentration, sont favorables à la croissance des plantes. A forte concentration, ils peuvent devenir toxiques pour ces dernières et pour la vie du sol (Marschner 1995). Sur la durée de cette étude, ces éléments traces ne semblent pas avoir porté préjudice aux cultures (résultats non présentés) ni à la biomasse microbienne (tabl. 5). Les effets des engrais de ferme à plus long terme restent toutefois à évaluer.

Effet de la dose d'azote

En 2009, la teneur en MO du sol augmente significativement avec la fertilisation N (tabl. 4). Cette augmentation peut être mise en relation avec l'augmentation de la biomasse des résidus de culture apportés au sol. Cependant, cet effet reste faible et seuls les sous-procédés les plus contrastés (A et D; tabl. 4) diffèrent significativement entre eux. Khan *et al.* (2007) impute ce faible effet de la fertilisation N sur le stockage du C à une plus forte vitesse de minéralisation de la MO du sol et des résidus de culture lorsque la fertilisation N augmente.

L'effet des sous-procédés sur la teneur en MO étant faible, le N total, le rapport C/N et la CEC ne diffèrent pas significativement. Le pH-H_2O n'est également pas significativement affecté par les sous-procédés, il tend cependant à décroître avec la dose d'engrais azoté. En effet, la nitrification du N-NH_4 des engrais ammoniacaux acidifient généralement le sol (Pernes-Debuysera et Tessier 2004). La fertilisation N diminue également significativement les teneurs en P, K et Fe extractibles à l'AAE et tend à diminuer les autres éléments extractibles à l'AAE (Mg, Ca, Cu, Zn et Mn). La fertilisation N, de par son effet positif sur le rendement des cultures, augmente l'exportation par les récoltes des éléments nutritifs (résultats non présentés) lorsque la fertilisation minérale en ces éléments n'est pas ajustée en fonction du rendement. Dans cet essai, la fertilisation minérale P et K est ajustée au niveau des procédés, mais reste identique pour les quatre sous-procédés.

Propriétés biologiques du sol

Les biomasses et les activités microbiennes mesurées en 1999 sont plus importantes dans les procédés recevant régulièrement des engrais organiques (EV, Pailles, Fu35 et Fu70; tabl. 5). Les micro-organismes trouvent vraisemblablement des conditions plus favorables à leur croissance dans ces sols plus riches en MO (fig. 1). Les engrais de ferme sont les engrais organiques les plus favorables aux micro-organismes (tabl. 5). Le lisier stimule davantage l'activité microbienne que le fumier, par contre la dose d'engrais de ferme (comparaison Fu35 et Fu70) semble avoir peu d'effet. Le rapport C/N microbien tend également à augmenter lorsque des engrais organiques sont régulièrement amenés (tabl. 5). Yang *et al.* 2007 ont observé un résultat similaire. Un changement du rapport C/N microbien indiquerait une modification de la nature de la flore microbienne (Fließbach *et al.* 2007). Cette modification peut expliquer les quotients respiratoires (qCO_2) plus élevés observés dans les procédés avec engrais organiques. Les micro-organismes dans ces procédés décomposeraient le C du sol plus rapidement. Des qCO_2 plus importants peuvent également traduire la présence de MO plus facilement dégradable. En effet, nous avons précédemment évoqué que la MO des sols recevant des engrais organiques semblaient contenir une plus grande proportion de MO fraîche partiellement décomposée (tabl. 4). La dose d'engrais azoté n'a par contre aucun effet significatif sur la biomasse et l'activité microbienne (tabl. 5).

Conclusions

- L'insertion d'engrais vert une année sur deux, la restitution systématique des pailles de céréales et l'apport tous les 3 ans de 35 t ha^{-1} de fumier ont le même effet sur le stockage de la MO dans le sol. Prises individuellement, ces pratiques ne permettent pas de maintenir la teneur en MO dans les sols labourés de cet essai. Elles doivent donc être combinées entre elles et/ou associées au non labour.
- SIMEOS-AMG est le modèle de bilan humique qui simule le mieux l'effet quantitatif des engrais organiques et de la fertilisation azotée sur l'évolution du stock de C. Il devra être ajusté aux conditions locales avant d'être utilisé comme outil d'aide à la décision par des vulgarisateurs.
- Après 34 années d'essai, les engrais organiques (engrais vert, pailles de céréales, fumier ou lisier) augmentent la teneur en MO du sol par rapport au témoin ne recevant que des engrais minéraux. Ils ont par contre peu d'effet sur les propriétés chimiques du sol. La CEC, le pH et les teneurs en macroéléments extractibles à l'AAE ne sont pas affectés. Seule la teneur en éléments traces extractibles à l'AAE augmente avec l'application régulière de fumier ou de lisier. Sur la durée de cette étude, ces éléments traces ne semblent pas avoir porté préjudice aux cultures ni à la biomasse microbienne. Leurs effets à plus long terme restent à évaluer.

- La fertilisation N améliore la teneur en MO du sol mais son effet est faible. Par ailleurs, elle tend à acidifier le sol et à l'appauvrir en P, K et Mg extractibles à l'AAE.
- Les sols recevant régulièrement des engrais organiques présentent une biomasse et une activité microbienne plus importante que les sols ne recevant que des engrais minéraux. La composition de cette biomasse semble également affectée par ces apports.

Riassunto

Effetto a lungo termine dei fertilizzati organici sulle proprietà del suolo

Dal 1976 a Changins sono testate le conseguenze dell'uso di diversi fertilizzanti organici (sovescio, paglia di cereali, 35 e 70 t ha^{-1} ogni 3 anni e 60 m^3 ha^{-1} di liquame ogni tre anni) e chimici (quattro dosi di azoto). Questo studio analizza i loro effetti a lungo termine sulle proprietà organiche, chimiche e biologiche del suolo. Dopo 34 anni di prove, quando alle colture è apportata una fertilizzazione azotata ottimale, il tenore in materia organica diminuisce di 0,50 g/100 g di terra per il procedimento «fertilizzanti minerali», di 0,20 g/100 g per «sovescio» e «paglia» e di 0,18 g/100 g per «letame 35 t ha^{-1} ogni 3 anni» e «liquame 60 m^3 ha^{-1} ogni 3 anni». Unicamente il procedimento letame 70 t ha^{-1} ogni 3 anni mostra un aumento del tenore del suolo di 0,15 g/100 g. I fertilizzanti organici non influenzano significativamente le principali proprietà chimiche del suolo, fatta eccezione per i tenori di elementi presenti in tracce. I procedimenti che ricevono letame e liquami presentano dei tenori in rame, ferro, zinco e manganese estraibili attraverso ammonio acetato EDTA più importanti rispetto al testimone «concimi minerali». Anche i concimi organici ottengono un effetto significativamente positivo sull'attività e la biomassa microbica e sembrano modificare la composizione di quest'ultima.

Summary

Long-term effect of organic fertilizers on soil properties

Consequences of the use of different organic fertilizers (green manure, cereal straw, manure at 35 and 70 t ha^{-1} every 3 years and cattle slurry at 60 m^3 ha^{-1} every 3 years) and mineral fertilizer (four doses nitrogen) are tested in Changins since 1976. This study analyses their long-term effect on organic, chemical and biological soil properties. After 34 years of trial, when crops receive optimal nitrogen fertilizer, the soil organic matter (SOM) content decreases 0,50 g/100 g of soil for the treatment «mineral fertilizer», 0,20 g/100 g for the treatments «green-manure» and «straws» and 0,18 g/100 g for the treatments «manure 35 t ha^{-1} every 3 years» and «slurry 60 m^3 ha^{-1} every 3 years». Only the treatment «manure 70 t ha^{-1} every 3 years» shows an increase in the SOM content of 0,15 g/100 g. Organic fertilizers do not significantly affect the main soil chemical properties, except for trace element contents. The treatments receiving manure and cattle slurry present higher amounts of copper, iron, zinc and manganese extractable in ammonium acetate EDTA than the control «mineral fertilizer». Organic fertilizers have also a positive significant effect on the activity and microbial biomass and seems to change the composition of this last.

Key words: organic fertilizers, mineral fertilizer, soil organic matter, soil properties, long-term field experiment.

Bibliographie

La liste bibliographique est disponible chez l'auteur.