

Effets de l'adoption des techniques culturales sans labour (TCSL) sur l'état physique des sols : conséquences sur la protection contre l'érosion hydrique en milieu tempéré

Jean Roger-Estrade^{1,2}
 Jérôme Labreuche³
 Guy Richard⁴

¹ AgroParisTech
 Département SIAFEE
 78850 Thiverval-Grignon
 France
 <estrade@grignon.inra.fr>
 <jean.roger_estrade@agroparistech.fr>

² Inra
 UMR 211
 INRA AgroParisTech
 Agronomie Grignon
 78850 Thiverval-Grignon
 France

³ Arvalis-Institut du végétal
 Station expérimentale
 91720 Boigneville
 France
 <j.labreuche@arvalisinstitutduvegetal.fr>

⁴ Inra
 UR 0272 Science du sol
 Centre de recherches d'Orléans
 45075 Orléans cedex 2
 <Guy.Richard@orleans.inra.fr>

Résumé

Dans ce texte, nous discutons, dans sa première partie, des effets de l'abandon du labour sur la structure du sol, sa porosité et sa stabilité structurale. Dans une seconde partie, nous présentons les conséquences de ces modifications sur la portance et l'érosion. En milieu tempéré, le bilan de l'effet des techniques culturales sans labour (TCSL) sur l'état physique des sols doit d'abord porter sur l'évolution de la structure. Si l'accumulation de carbone est favorable à l'accroissement de la stabilité structurale en surface, l'arrêt du labour se traduit également par une modification sensible de la porosité du sol : lorsque ce dernier n'est plus labouré, la porosité diminue en général durant les premières années qui suivent l'arrêt du labour. De plus, la porosité change de nature sous l'effet de l'activité biologique, des racines et du climat. L'effet de ces facteurs dépend du type de sol, du climat, du système de culture et de la durée de la période de suppression du labour. Si les TCSL ont d'abord été envisagées en milieu tropical pour prévenir l'érosion, leur développement en climat tempéré répond souvent à la recherche d'une diminution des coûts de production et des charges de mécanisation. Cependant, la maîtrise de ce mode de gestion des sols et son efficacité dans la prévention de l'érosion hydrique ne vont pas de soi : il faut, pour que la protection soit effective, que la couverture du sol soit suffisante et que l'infiltrabilité ne soit pas trop faible.

Mots clés : érosion du sol ; labour ; propriété physique du sol ; travail du sol de conservation.

Thèmes : productions végétales ; sols.

Abstract

Effects of no-ploughing methods on soil physical properties: Consequences on soil erosion in a temperate climate

In this paper, we present a review of the literature on the effects of no-ploughing on soil structure, porosity and stability. In the second part, we discuss the consequences on soil erosion in a temperate environment. The effect of reduced tillage on soil physical properties has firstly to be evaluated on soil structure. If carbon accumulation on the soil surface improves aggregate stability, no-ploughing also greatly affects soil porosity. Not only does it decrease during the period following adoption of no-ploughing, but it also changes in nature and connectivity due to weathering, roots and biological activity. However, the efficiency of these factors is site-dependent and varies with the duration of no-ploughing and the crop sequence. Under tropical climates, reduced tillage systems have been proposed to prevent soil erosion while in temperate areas the present increase of no-till is motivated firstly by the decrease of production and mechanization costs. However, the efficiency of the numerous no-plough tillage systems on erosion control is not systematic. The soil must be sufficiently covered by crop residues and the infiltration

Pour citer cet article : Roger-Estrade J, Labreuche J, Richard G, 2011. Effets de l'adoption des techniques culturales sans labour (TCSL) sur l'état physique des sols : conséquences sur la protection contre l'érosion hydrique en milieu tempéré. *Cah Agric* 20 : 186-93. doi : 10.1684/agr.2011.0490

Tirés à part : J. Roger-Estrade

rate has to remain high enough. This note critically assesses the available results on these two aspects of the effect of reduced tillage on soil physics.

Key words: conservation tillage; ploughing; soil erosion; soil physical properties.

Subjects: soils; vegetal productions.

Considéré du seul point de vue de son rôle sur la production agricole en milieu tempéré, le travail du sol a pour objectifs d'assurer la mise en place des cultures et le fonctionnement des racines, d'améliorer la circulation de l'eau et de l'air dans le sol, de favoriser son réchauffement et de limiter les infestations de mauvaises herbes et d'un certain nombre de bioagresseurs telluriques (Roger-Estrade *et al.*, 2010). En particulier, le labour joue un rôle important dans l'atteinte de ces objectifs multiples, à travers deux actions fondamentales : sur la structure du sol d'une part, et sur la localisation de la matière organique, des éléments minéraux, des zones de sol tassées et des bioagresseurs, d'autre part. Cependant, comme pour tout acte technique en agriculture, la réussite n'est pas systématique et, lorsque les conditions de réalisation sont défavorables, le labour peut avoir des effets négatifs : création d'une semelle lorsqu'il est pratiqué en conditions humides (et/ou que la largeur des pneumatiques n'est pas adaptée à la largeur de travail de la charrue), enfouissement de « paquets » de matières organiques créant des zones défavorables au fonctionnement des racines dans le profil cultural (Ball *et al.*, 1997).

L'abandon du labour, qui peut prendre de nombreuses formes (du semis direct à des itinéraires avec travail superficiel qui peuvent parfois être plus complexes que les systèmes dits « conventionnels ») a deux effets directs : l'absence de retournement du sol et la modification des conditions de fragmentation de l'ensemble des couches de sol travaillées. Ces deux effets vont profondément modifier les propriétés physiques et leurs conséquences (Holland, 2004 ; Peigné *et al.*, 2007).

Le non-retournement du sol entraîne l'apparition de gradients verticaux marqués dans la couche arable. Cela

concerne en premier lieu la matière organique qui s'accumule en surface et dans les premiers centimètres de sol (Six *et al.*, 2002 ; Pagliari *et al.*, 2004). Cette matière organique joue un rôle très important dans la protection physique de la surface du sol, la stabilisation de la structure, la rétention d'eau (Chenu *et al.*, 2000 ; Chaplain *et al.*, 2011 ; Alletto *et al.*, 2010). Elle sert d'abri et de source de nourriture pour les organismes du sol. Par ailleurs, l'absence de perturbation du sol profite également à de nombreux représentants de la faune du sol, ce qui favorise ainsi l'accroissement des populations et la diversification des communautés. Cela est notamment le cas des lombriciens. De même, l'arrêt du labour préserve la porosité qui se crée après la décomposition des racines. Cela concerne également les champignons, dont le rôle sur les propriétés physiques concerne la stabilisation de la structure par le réseau d'hyphes qu'ils développent. Mais face à ces conséquences globalement positives pour la production, on peut mentionner des effets qui le sont moins, car le non-retournement profite aussi à certains bioagresseurs qui exercent une pression plus intense en l'absence de labour : plantes adventices qui ne sont plus détruites (Colbach *et al.*, 1999 ; Colbach et Debaecke, 2000) et dont les graines ne sont plus enfouies, agents pathogènes qui restent en surface, limaces protégées par les résidus (Kreye, 2004), rongeurs dont les terriers ne sont plus détruits (Witmer *et al.*, 2007). Cela conduit à réviser la stratégie de protection des cultures, avec en particulier un recours accru à la lutte chimique ou mécanique, ce qui implique un plus grand nombre de passages dans le champ et donc une augmentation des risques de tassement des sols.

La seconde conséquence directe du non-labour est la modification des

conditions de fragmentation du sol. En cas de semis direct, dans les années qui suivent l'abandon du labour, cela signifie souvent une diminution de la porosité structurale. Cette diminution est moins marquée s'il y a un travail superficiel, et elle est d'autant moins marquée que ce travail est plus profond. Elle devient moins perceptible lorsque s'accroît la durée entre l'abandon du labour et la date d'observation car les processus naturels d'évolution de la porosité prennent le relais du travail du sol, avec une efficacité qui dépend du type de sol et de climat. La géométrie du système poral est également fortement modifiée, avec des conséquences importantes sur la croissance des racines, les flux d'eau et de gaz, le microclimat du sol et donc l'activité biologique.

Ces modifications des propriétés physiques par rapport à la situation régulièrement labourée vont avoir des conséquences contradictoires sur la portance et sur le déclenchement de l'érosion hydrique (Boiffin *et al.*, 1988). Sur ce dernier point par exemple, l'infiltration plus faible favorise le ruissellement, mais la stabilité structurale plus grande limite la bat-tance. De même, la présence d'un mulch en surface améliore la portance mais ralentit l'évaporation, ce qui maintient le sol humide plus longtemps et augmente le risque de tassement. L'objectif de cet article est de faire un bilan critique de ces effets, en milieu tempéré. Nous traiterons successivement des effets de la suppression du labour d'une part sur l'évolution de la structure et des paramètres qui la caractérisent, d'autre part, sur la protection contre le tassement et l'érosion hydrique. Nous ne prétendons pas à une revue exhaustive de la littérature sur le sujet et nous avons privilégié dans nos citations les revues dans lesquelles le lecteur pourra approfondir les différents aspects de la question traitée.

Suppression du labour et évolution de la structure du sol : porosité et stabilité structurale

Porosité structurale

De nombreux essais sur la simplification du travail du sol, dont l'essai français de Boigneville (91) géré depuis 1970 par Arvalis Institut du végétal (anciennement ITCF), montrent que les situations non labourées présentent, après quelques années, un sol dont l'état structural se caractérise par une compacité plus importante qu'en situation régulièrement labourée et par des caractéristiques du système poral très différentes. Ce nouvel état structural, qui n'est souvent caractérisé dans la littérature que par un niveau moyen de porosité (totale ou structurale), diffère très fortement d'un site expérimental à un autre (Tebrügge et Düring, 1999 ; Kay et Vandendbygaart, 2002). En effet, plusieurs facteurs naturels de structuration du sol contrecarrent cette diminution de la porosité et l'intensité de leur action dépend beaucoup du contexte pédoclimatique : l'activité de la macrofaune du sol, par ailleurs favorisée par les techniques culturales sans labour (TCSL, [El Titi, 2003 ; Pelosi *et al.*, 2009]), l'enracinement des plantes et l'action du climat (Boizard *et al.*, 2002) jouent ainsi, en climat tempéré, un rôle majeur sur l'entretien de la porosité des sols en TCSL.

En général, la différence de porosité totale entre sols identiques travaillés et non travaillés est faible : elle est de l'ordre de 5 à 10 % sur le sol limoneux de Boigneville (Guéris, 1991). Mais cet effet sur la porosité peut avoir des conséquences importantes sur l'infiltration. Par ailleurs, le résultat dépend beaucoup de la profondeur de sol sur lequel on fait l'observation : la diminution de porosité est généralement observée sur un horizon compris entre 5 et 20 cm de profondeur (Rasmussen, 1999 ; Kay et Vandendbygaart, 2002). Mais en surface, la porosité d'un sol non travaillé peut être équivalente ou

supérieure à celle du même sol régulièrement labouré (Tebrügge et Düring, 1999 ; Yang et Kay, 2001) du fait de l'intensité, plus forte à ce niveau, des actions du climat et de la faune.

La présence d'un couvert végétal, vivant ou mort, améliore la porosité de la surface du sol, soit directement (chenaux des racines mortes, résidus enchâssés dans le sol), soit indirectement en accroissant l'activité biologique de la macrofaune et donc la porosité qui en résulte (Capowiez *et al.*, 2009). Cette amplification de la porosité augmente l'infiltrabilité, réduisant ainsi le ruissellement. Dans le cas d'un couvert végétal vivant, quelques observations de terrain font aussi état de la présence d'une porosité persistante localisée à la base des tiges, pouvant améliorer la perméabilité du sol (effet de mèche). Enfin, la présence de résidus ou d'un couvert végétal vivant diminue la vitesse d'écoulement superficiel de l'eau car les plantes ou les débris végétaux constituent des obstacles au cheminement de l'eau qui affaiblissent l'érosivité de l'eau ruisselante (Kwaad *et al.*, 1998 ; Findeling *et al.*, 2003).

Au-delà du strict aspect quantitatif, il faut considérer que le non-travail permet, en l'absence de tassement sévère, de maintenir sans discontinuité l'existence d'un volume de pores dans l'ensemble de l'ancienne couche travaillée ; de plus, les chenaux des vers de terre anéciques font progressivement disparaître, lorsqu'elle existe, l'ancienne semelle de labour (Capowiez *et al.*, 2009 ; Pelosi *et al.*, 2009). Enfin, le non-labour conserve la porosité créée par la (ou les) culture(s) précédente(s), après que leurs racines se sont décomposées (Deurer *et al.*, 2009). Ainsi, une approche uniquement fondée sur une évaluation quantitative de la structure (à travers la mesure de l'indice des vides, de la masse volumique, de la porosité...) n'est pas suffisante pour juger de l'effet réel du non-labour sur l'état physique du sol et, surtout, sur les propriétés qui lui sont associées, et au premier rang desquelles figure la conductivité hydraulique. La nature des pores, leur géométrie, leur connectivité, leur orientation, la distribution des diamètres équivalents sont autant de critères qui sont modifiés et qui jouent également un rôle fondamental. Cela explique que les études publiées par

exemple sur les conséquences du non-labour sur la circulation de l'eau donnent parfois des résultats contradictoires. Ainsi l'étude de Carof *et al.* (2007) évaluant, pendant 3 ans, dans un sol de limon du Bassin parisien, un système de culture en semis direct (avec et sans couverture permanente du sol), montre que la proportion des pores d'assemblage (vides entre les agrégats) diminue au profit des biopores. Cette modification de la nature de la porosité s'accompagne d'une modification des conditions d'infiltration de l'eau mais le coefficient de conductivité hydraulique en conditions saturées reste plus élevé pendant la durée de l'étude dans le traitement labouré. Les auteurs montrent par ailleurs un effet de la nature des plantes de couverture, lié à la différence de caractéristiques des systèmes racinaires. Ce type de résultat est conforme à ceux de Lampurlanés et Cantero-Martínez (2003) et de Sasal *et al.* (2006). En revanche, d'autres études (Suwardji et Eberbach, 1998 ; Bhattacharyya *et al.*, 2006) montrent une meilleure infiltration de l'eau en situations non labourées. Cependant, dans ces travaux, l'évaluation de la conductivité hydraulique a eu lieu plus de 4 ans après que le labour a été abandonné.

Ces résultats suggèrent qu'il existe une période de transition pendant laquelle l'organisation de la structure du sol se modifie progressivement pour atteindre un nouvel état, qui dans certains cas peut être aussi peu pénalisant, voire meilleur, pour les cultures et l'environnement qu'en situation labourée. La durée d'atteinte de ce nouvel état de la porosité totale après l'adoption (permanente) de TCSL est de l'ordre de quelques années mais diffère fortement d'une situation à l'autre, tout particulièrement en climat tempéré où les actions structurantes des agents naturels peuvent être moins intenses qu'en climat tropical (activité biologique, vitesse de croissance des plantes, taux annuel d'accumulation du carbone) mais aussi, dans certains cas, plus rapides (effet par exemple des alternances gel-dégel ou humectation dessiccation sur un sol argileux). Kay et Vandendbygaart (2002) rapportent que la différence de porosité n'est pas systématiquement observée lorsque les études sont réalisées depuis moins de 10 ans, mais qu'après 15 ans, les

situations labourées diffèrent systématiquement des situations non labourées. À l'opposé, l'étude réalisée à Boigneville montre un pseudo-équilibre poral atteint plus rapidement, en 3 ans (Guérif, 1994). Cependant, l'examen des courbes d'évolution de la porosité structurale au cours de la période qui suit l'abandon du labour révèle des fluctuations entre années autour du niveau moyen de porosité : certaines années, la diminution est très forte, du fait de compactages sévères lors des passages d'engins agricoles et/ou lorsque l'intensité de la fissuration est faible, mais le phénomène inverse peut également être observé, lorsque le climat permet une régénération importante de la porosité et/ou que les compactages sont peu intenses. On peut penser que cet état d'équilibre apparent de la structure cache également des fluctuations intra-annuelles : un compactage lors d'une récolte, par exemple, entraîne une baisse brutale de la porosité alors que l'action de régénération du climat ou de la faune est plus progressive. Tebrügge et Düring (1999) montrent qu'au cours d'une année, la porosité évolue différemment entre un sol labouré et un semis direct : après un labour d'automne, la porosité totale est très importante, du fait essentiellement d'une proportion élevée de pores de grande taille après fragmentation par la charrue. Ces auteurs, étudiant un essai de longue durée en Allemagne sur un sol argilo-limoneux (31 % d'argile, 53 % de limon et 16 % de sable), montrent qu'en situation labourée, la porosité totale est en moyenne, sur l'horizon 0-24 cm, de 52 % en automne. Elle chute à 46 % environ en mai. À l'automne, 50 % de la porosité totale est constituée de pores dont le diamètre équivalent est supérieur à 120 µm ; au printemps, cette catégorie de pores ne représente plus que 20 % environ de la porosité totale. En situation non labourée, la porosité moyenne évolue en sens inverse, passant, entre l'automne et le printemps, de 40 à 45 % sur la même épaisseur de sol (0-24 cm). Cette évolution est liée à la reprise de l'activité lombricienne au printemps, en particulier celle des vers anéciques attirés par les résidus laissés en surface, compensant ainsi l'absence d'ameublissement mécanique sous semis direct. La part des pores de diamètre

supérieur à 120 µm est beaucoup plus faible (15 % environ) qu'en situation labourée et évolue très peu entre l'automne et le printemps.

La prévision de l'état structural moyen en situation non labourée n'est donc pas suffisante pour évaluer les risques liés à une suppression définitive du labour. Il faut également prévoir la dynamique d'évolution de la structure au cours du temps, entre années, en fonction des cultures de la succession, et dans l'année, au cours de l'interculture ou pendant les différentes phases du développement du peuplement végétal.

Cela suppose tout d'abord de prévoir les effets du tassement sur la porosité de fissure et la porosité biologique ; il faut également prévoir la vitesse à laquelle le climat, la faune ou les racines régénèrent les états dégradés. Concernant l'effet des lombriciens, ce point a fait l'objet de plusieurs recherches (Pérès *et al.*, 1998; Wright *et al.*, 1999 ; Anken *et al.*, 2004 ; Pelosi *et al.*, 2009). Dans la plupart de ces études, on montre que les techniques de travail superficiel et de semis direct accroissent considérablement le nombre de vers de terre par rapport au témoin régulièrement labouré (jusqu'à six fois en biomasse), ce qui se traduit en général par une augmentation du nombre moyen de galeries, en particulier verticales. Mais, il peut arriver qu'il y ait aussi quelques cas de diminution de la taille des communautés lombriciennes avec l'abandon du labour et l'adoption de techniques de travail du sol superficiel.

Stabilité structurale

La stabilité structurale est la propriété physique la plus étudiée dans les expérimentations comparant le non-labour au labour. En TCSL, l'augmentation des teneurs en matière organique au voisinage de la surface du sol et l'activité accrue des micro-organismes favorisent la stabilisation de la structure. La relation entre le taux de carbone et la stabilité est bien connue (Ball *et al.*, 1996 ; Le Bissonnais, 1996 ; Balesdent *et al.*, 2000 ; Chenu *et al.*, 2000 ; Six *et al.*, 2002 ; Pagliai *et al.*, 2004). L'augmentation de la stabilité structurale est directement proportionnelle à celle de la teneur en matière organique stable. Les travaux

européens et américains montrent une vitesse d'augmentation du carbone organique généralement comprise entre 10 et 60 g C/m²/an (Balesdent, 2002 ; West et Post, 2002) avec un minimum autour de 4 g C/m²/an (Tebrügge et Düring, 1999) et un maximum de 120 g C/m²/an (Soane et Ball, 1998). En effet, cette valeur dépend fortement de la productivité primaire des agrosystèmes considérés et des quantités de matériel organique restituées. Une étude récente (Metay *et al.*, 2009) montre, en climat tempéré, un effet spécifique moyen des TCSL, évalué à 10 g C/m²/an sur une période de 28 ans après suppression du labour. Cette étude souligne par ailleurs un effet intéressant : ce taux d'accumulation apparaît sensiblement plus faible que celui mesuré sur les 20 premières années dans le même essai (20 g C/m²/an). Cette variation décroissante de la capacité de stockage avec la durée de TCSL est cohérente avec la tendance moyenne observée dans cette étude à partir d'un large échantillonnage de données de la littérature internationale. Enfin, les auteurs ne notent pas de différence significative entre le semis direct et le travail superficiel.

En TCSL, la teneur en matière organique des sols (MOS) augmente essentiellement en surface : West et Post (2002) estiment que 85 % de la matière organique s'accumule dans les 7 premiers centimètres. Avec les mêmes hypothèses de calcul que précédemment, on montre qu'il faut 8 ans pour gagner 1 % de MOS dans cet horizon. Cette augmentation de la teneur en MOS des sols ne se fait pas indéfiniment : elle s'arrête lorsqu'un nouvel équilibre est atteint entre apports et pertes de MOS. Les estimations du temps nécessaire pour atteindre ce nouvel équilibre sont très variables dans la littérature : 10 à 20 ans (West et Post, 2002), 25 à 30 ans (Lal *et al.*, 1998), 50 à 100 ans (Smith *et al.*, 1998 ; Balesdent, 2002). Cette variabilité des vitesses et des durées d'augmentation découle de la diversité des types et quantités d'apports organiques. À l'effet de stabilisation lié à l'accroissement de matière organique stable, s'ajoute celui de la biomasse du sol. Beare *et al.* (1994) ont montré le rôle des micro-organismes sur la stabilité structurale et souligné le rôle prédominant des

champignons et des bactéries dans le processus d'agrégation des sols. Le nouvel état physique du sol mis en place en régime de TCSL, détermine les conditions de transfert d'air, de chaleur et d'eau (ruissellement, infiltration et drainage) et la suppression du labour favorise le développement de l'activité biologique en limitant les perturbations de l'habitat de la faune et des micro-organismes. Ainsi, si la diminution de la fragmentation liée au labour entraîne une diminution de la rugosité en surface, l'activité des vers de terre peut la rétablir en partie, grâce à la création de turricules. Enfin, l'amélioration de la stabilité structurale et la présence d'un mulch limitent la formation de croûte de battance. Cet ensemble de processus intervient dans l'évaluation de l'effet de la suppression du labour sur le ruissellement et l'érosion.

Suppression du labour et protection contre le tassement et l'érosion hydrique

Tassement du sol

Guérif (1991), observe une augmentation de la portance du sol dans l'essai de Boigneville : la déformation verticale en non-travail est de quelques centimètres (5 à 10 cm pour des engins de récolte présentant des pressions au sol de 500 à 600 kPa) alors qu'elle peut affecter toute la couche travaillée en labour. L'effet bénéfique des TCSL sur la portance dépend néanmoins de l'état initial du sol et des conditions dans lesquelles les pratiques agricoles sont effectuées : une circulation des engins en conditions humides peut avoir des effets négatifs importants sur la porosité de surface et sur l'infiltration. Ainsi, malgré une meilleure portance en situation régulièrement non labourée, les conséquences d'un roulage en conditions humides peuvent avoir des effets négatifs équivalents à ceux observés dans les parcelles labourées (Richard *et al.*, 2004).

Gruber et Tebrügge (1990) montrent, à partir du recensement des résultats de plusieurs études de longue durée

en Allemagne dans une gamme large de types de sols, que ceux soumis au non-labour (semis direct, travail superficiel) présentent une plus grande résistance à la déformation sous l'effet des passages de roues que ceux qui sont régulièrement labourés. Tebrügge et Düring (1999) montrent des résultats comparables sur un sol de type limono-argileux en utilisant des tests triaxiaux sur des échantillons de sol provenant de parcelles labourées, soumises à un travail superficiel et en semis direct : les tests ne montrent pas de différence entre le témoin labouré et le traitement en travail superficiel, mais dans le cas de l'échantillon provenant de la parcelle en semis direct, la rupture a lieu pour des pressions axiales significativement supérieures, traduisant une meilleure résistance aux contraintes mécaniques.

Cela étant, pour établir un bilan sur l'effet de la suppression du labour sur les risques de tassement du sol, il importe de ne pas se limiter au seul comportement du matériau sous l'effet d'une contrainte mécanique. Globalement, ce bilan est plutôt positif. Plusieurs auteurs ont montré que dans les systèmes de travail du sol sans labour, l'on observait une diminution de la proportion de la surface de la parcelle compactée, en grande culture aussi bien qu'en sols viticoles (Richard *et al.*, 1995). De même, il importe de prendre en compte l'humidité du sol au moment des interventions. Si la présence d'un mulch préservant le sol de l'évaporation accroît un peu les risques d'intervention en conditions humides, le temps gagné en ne labourant plus accroît le nombre de jours disponibles pour la préparation des sols (en cas de travail superficiel) ou le semis (lorsqu'on pratique le semis direct) et donc le nombre de jours disponibles pour intervenir dans de bonnes conditions.

Érosion

Si en milieu tropical, les TCSL ont d'abord été développées pour protéger les sols de l'érosion, les motivations sont plus complexes en milieu tempéré et concernent souvent en premier lieu les raisons d'ordre économique (diminution des charges de mécanisation, des coûts de production) avant les

raisons environnementales, même si l'effet bénéfique sur la protection contre l'érosion hydrique est souvent avancé.

Cependant, compte tenu de la multiplicité des impacts de la suppression du labour mentionnés ci-dessus, les effets de la simplification du travail du sol sur l'érosion hydrique sont multiples et parfois contradictoires. Dans leur synthèse bibliographique, Boiffin et Monnier (1991) avaient dressé le constat suivant, qui reste valable :

- les TCSL sont mieux adaptées, en France, aux régions subissant une érosion de versant en rigole-inter-rigole qu'à celles présentant une érosion de talweg par ruissellement concentré ;

- l'effet de la couverture du sol, par une culture ou des résidus, est prépondérant, par rapport aux modifications des propriétés physiques, dans l'efficacité des TCSL sur la maîtrise de l'érosion ;

- enfin, les positions relatives des parcelles labourées et non labourées dans le territoire jouent un rôle crucial sur la maîtrise de l'érosion de versant. Dans une synthèse des résultats de 22 expérimentations portant sur des mesures directes de ruissellement faites sous pluie naturelle et concernant une large gamme de types de sol, Bonafos *et al.* (2007) observent que, par rapport à la modalité témoin labour, l'impact des différentes modalités de TCSL est compris entre -100 % et + 272 % pour le ruissellement et -100 % et + 280 % pour la perte en terre. Cette synthèse met donc en lumière la grande variabilité des résultats ; mais si l'on considère une situation pour laquelle le non-labour est pratiqué depuis plusieurs années en conditions favorables (tassements limités) et avec une protection significative du sol par les résidus de culture, les effets de la simplification sur les risques d'érosion sont positifs et cette même étude montre que, en comparaison avec le labour, l'érosion est réduite dans 83 % des cas avec un pseudo-labour, dans 90 % des cas pour le travail superficiel, et dans 85 % des cas pour le semis direct.

L'efficacité des TCSL, mesurée par la réduction des quantités de terre érodée, est très variable selon les situations mais elle est souvent très importante : en semis direct par exemple, on observe dans les références citées dans

la synthèse de Bonafos *et al.* (2007) une réduction de l'érosion (c'est-à-dire des quantités de terre déplacées par hectare) d'un facteur supérieur à 5 dans plus de 60 % des cas. Plusieurs facteurs jouent un rôle majeur sur la limitation de l'érosion en l'absence de retournement du sol : la couverture du sol, l'augmentation de la teneur en matière organique en surface, et la date du phénomène érosif.

Couverture du sol

L'ensemble des résultats montre que la présence d'un couvert végétal significatif en surface est un facteur majeur de réduction des risques d'érosion. Cette couverture du sol peut être constituée par les résidus de la culture précédente qui ne sont plus enfouis par un labour ou bien par une plante de couverture semée pendant l'interculture. Elle permet une réduction de l'érosion d'un facteur 1 à 10 (Tebrügge et Düring, 1999 ; Bundy *et al.*, 2001 ; Heddadj *et al.*, 2005). Pour qu'elle soit efficace, les auteurs considèrent qu'il faut dépasser un taux de recouvrement du sol de 25 à 40 % de la surface (Kwaad *et al.*, 1998). Le couvert végétal protège d'abord le sol de l'action des gouttes de pluie et limite l'érosion par effet « *splash* » (Döring *et al.*, 2005) ainsi que la formation et l'extension d'une croûte de battance (Ouvry, 1990 ; Boiffin et Monnier, 1991 ; Kwaad *et al.*, 1998). En l'absence de couverture du sol, l'efficacité des TCSL est beaucoup plus controversée. Le facteur principal est alors l'accroissement de la résistance à l'arrachement et la diminution de la rugosité (Kwaad *et al.*, 1998 ; Heddadj *et al.*, 2005).

Augmentation de la teneur en matière organique en surface

L'autre facteur essentiel de l'impact des TCSL sur l'érosion est l'augmentation de la teneur en matière organique en surface (voir ci-dessus) qui accroît la stabilité structurale des agrégats très liée au taux de carbone organique du sol (Franzluebbers et Arshad, 1996 ; Le Bissonnais et Arrouays, 1997 ; Rhoton *et al.*, 2002). De nombreux auteurs ont établi que la stabilité structurale des sols est corrélée positivement au taux de carbone organique. Cet accroisse-

ment est d'autant plus notable que les sols sont à faible stabilité structurale. L'impact des TCSL sur la stabilité structurale est donc plus visible en sols limoneux qu'en sol argileux (Rhoton *et al.*, 2002).

L'accroissement de la stabilité structurale des agrégats de surface en TCSL permet de réduire la détachabilité des particules et donc l'érosion diffuse (érosion en nappe). Les TCSL permettent également d'accroître la cohésion apparente des sols (Leonard et Richard, 2004), ce qui réduit l'érosion linéaire : la force de cisaillement critique est 1,2 à 2 fois plus élevée en semis direct qu'en labour (Poesen et Govers, 1990 ; Boiffin et Monnier, 1991). La capacité des TCSL à réduire le ruissellement permet également de réduire l'érosion diffuse et linéaire. Enfin, les TCSL diminuent la rugosité de surface par rapport à un labour. Cela a pour conséquence de réduire la détention superficielle de l'eau – ce qui peut accroître le ruissellement si la couverture végétale est insuffisante – et de réduire la concentration en sédiments de l'eau ruisselée (Cerdan, 2001).

C'est sur des sols argileux que l'efficacité des TCSL pour limiter l'érosion est la plus probante (Rhoton *et al.*, 2002). Sur des sols sableux, l'efficacité des TCSL semble moindre (Quinton et Catt, 2004) alors que sur des sols limoneux, les résultats sont très variables et dépendent essentiellement d'autres paramètres tels que la couverture du sol (Martin *et al.*, 2010).

Date du phénomène érosif

Les TCSL peuvent être efficaces pour lutter contre un phénomène érosif à une certaine période de l'année mais inefficaces si ce phénomène se déclenche à une autre période. C'est souvent l'évolution du taux de couverture et de la porosité du sol qui explique ces différences. En l'absence de couvert végétal couvrant suffisamment la surface du sol pendant les périodes critiques pour l'érosion, les TCSL ont une efficacité beaucoup plus incertaine (Martin *et al.*, 2010). Ainsi, sous pluie simulée, Heddadj *et al.* (2005) montrent que le blé suivant un maïs grain semé après un labour est moins ruisselant que le blé semé directement sur sol nu. Lorsque la

rotation implique des cultures produisant beaucoup de résidus et que ceux-ci sont maintenus en surface, les différents types de TCSL permettent, par rapport au labour, une réduction du ruissellement d'un facteur 1 à 5 et de l'érosion d'un facteur 1 à 10 (Tebrügge et Düring, 1999 ; Bundy *et al.*, 2001).

Il faut également considérer la stabilité dans le temps de l'effet des TCSL sur l'érosion. Suivant les années, dans un même contexte expérimental, l'effet d'une technique peut avoir une efficacité très variable, et, dans certains cas, il peut même s'inverser d'une année sur l'autre (Doina et Dunitru, 2009). Du fait des variations des conditions climatiques au moment de l'intervention, cette technique peut avoir des effets très différents sur le sol. Ainsi, de mauvaises conditions climatiques lors des récoltes entraînent des tassements qui réduisent fortement l'infiltration de l'eau, favorisant le ruissellement et accroissant les risques de formation de ravines dans les parcelles situées en aval (Bonafos *et al.*, 2007). Ou encore, comme les résidus laissés au sol après certaines cultures (pois, betterave, pomme de terre, maïs ensilage) sont peu abondants, l'effet bénéfique attendu du mulch qui en résulte vis-à-vis de l'impact des gouttes de pluie ou du ruissellement est alors perdu.

Les TCSL peuvent donc constituer un moyen très efficace pour lutter contre l'érosion. C'est d'ailleurs cette efficacité qui explique en grande partie le développement de ces techniques pour lutter contre des événements érosifs à travers le monde : aux États-Unis dans les années 1930 (*dust bowl*) ou en Amérique du Sud dans les années 1980 (érosion hydrique). Les TCSL sont actuellement utilisées pour lutter contre l'érosion éolienne au nord de la Chine, avec des problèmes de nuages de poussière sur Pékin, ou contre l'érosion hydrique en République tchèque ou en Norvège, avec la mise en place d'aides publiques pour l'utilisation de ces techniques. En France, les résultats montrent que les TCSL sont capables de limiter l'érosion dans la grande majorité des cas. Toutefois, l'impact reste fondamentalement lié aux multiples conditions qui entourent la technique : ce n'est pas tant le non-labour en lui-même qui diminue l'érosion mais le fait que

les TCSL permettent : i) de maintenir une couverture du sol ; ii) d'augmenter la teneur en matière organique à la surface du sol ; iii) de favoriser la création de biopores par l'activité biologique. L'effet obtenu est donc très dépendant de la présence d'un couvert, en relation avec le système de culture, le système érosif et le contexte pédoclimatique. Il est donc nécessaire de raisonner l'ensemble de ces aspects pour favoriser l'expression des effets positifs des TCSL contre l'érosion.

Conclusion

On associe souvent à l'adoption des TCSL un effet positif sur l'état physique du sol et sur la limitation de l'érosion hydrique. Mais cet effet est loin d'être systématique et, surtout, constant. Les fluctuations intra- et interannuelles de l'état structural des 30 premiers centimètres du sol peuvent limiter l'infiltration de l'eau ou l'enracinement des cultures. Leur amplitude dépend du type de sol, du climat et des systèmes de culture (rotation, équipement, dates de semis et de récolte). Les conséquences sur le tassement et l'érosion hydrique sont très liées à cette évolution de l'état structural mais dépendent aussi très largement de la qualité de la couverture du sol, et l'effet positif des TCSL passe donc par la possibilité qu'elles offrent de maintenir cette couverture tout au long de l'année.

Finalement, les effets sont très dépendants du type d'itinéraire de préparation du sol choisi. Entre le système conventionnel avec labour à l'aide d'une charrue à versoir suivi d'une ou plusieurs opérations de travail superficiel et le semis direct, où il n'y a aucune intervention autre que sur la ligne de semis, existe une infinité de modalités qui varient par le nombre d'opérations, le degré de fragmentation et la profondeur de travail.

Prévoir les conséquences de la suppression du labour sur les propriétés physiques du sol et sur son fonctionnement impose donc d'étudier la dynamique d'évolution de la structure du sol en tenant compte de l'ensemble des éléments de l'itinéraire technique et du système de culture. La dimension spatiale du problème est aussi importante à considérer. Cette dynamique

doit être analysée en tenant compte de la position de chacune des parcelles constitutives d'un bassin-versant. Enfin, l'agriculteur ne raisonne pas seulement le travail du sol en fonction des seuls effets sur la composante physique de l'état des sols qu'il cultive ; il doit tenir compte également des autres fonctions de ces opérations : réussite du semis, lutte contre les adventices, parasites et ravageurs, diminution de l'emploi de pesticides. Sur ces différents points également, l'effet des TCSL est variable... ■

Remerciements

Cet article a été le support d'une communication lors de la séance de l'Académie d'agriculture de France du 10 juin 2009 intitulée « *Développement des techniques de cultures sans labour (TCSL) : implications agronomiques et environnementales* ».

Références

- Alletto L, Coquet Y, Roger-Estrade J, 2010. Two-dimensional spatial variation of soil physical properties in two tillage systems. *Soil Use Manage* 26 : 432-44.
- Anken T, Weisskopf P, Zihlmann U, Forrer H, Jansa J, Perhacova K, 2004. Long term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil Till Res* 78 : 171-83.
- Balesdent J, 2002. Estimations chiffrées, par unité de surface, du stockage de carbone dans le sol associé aux changements de pratiques agricoles. In: Arrouays D, Balesdent J, Germon JC, Jayet PA, Soussana JF, Stengel P, eds. *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France? Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Expertise collective*. Paris : Inra éditions. [Téléchargeable sur www.inra.fr].
- Balesdent J, Chenu C, Balabane M, 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till Res* 53 : 215-30.
- Ball BC, Cheshire MV, Robertson EAG, Hunter EA, 1996. Carbohydrate composition in relation to structural stability, compactibility and plasticity of two soils in a long term experiment. *Soil Till Res* 39 : 143-60.
- Ball BC, Campbell DJ, Douglas JT, Henshall JK, O'Sullivan MF, 1997. Soil structural quality, compaction and land management. *Eur J Soil Sci* 48 : 593-601.
- Bhattacharyya R, Prakash V, Kundu S, Gupta HS, 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil Till Res* 86 : 129-40.
- Beare BH, Hendrix PF, Coleman DC, 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in

conventional and no tillage soils. *Soil Sci Soc Am J* 58 : 777-86.

Boiffin J, Monnier G, 1991. Simplification du travail du sol et érosion hydrique. *Perspectives Agricoles* 161 : 24-30.

Boiffin J, Papy F, Eimberck M, 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I – Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie* 8 : 663-73.

Boizard H, Richard G, Roger-Estrade J, Dürr C, Boiffin J, 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. *Soil Till Res* 64 : 149-64.

Bonafos A, Le Bissonais Y, Ouvry JF, 2007. Impact des TCSL sur le ruissellement et l'érosion. In : Labreuche J, et al, eds. *Évaluation des impacts environnementaux des techniques culturales sans labour (TCSL) en France*. Rapport final du contrat ADEME 04 75C 0014. Angers : Ademe éditions.

Bundy LG, Andraski TW, Powell JM, 2001. Management practices effects on phosphorous losses in run-off in corn production systems. *J Environ Qual* 30 : 1822-8.

Capowiez Y, Cadoux S, Bouchand P, Ruy S, Roger-Estrade J, Richard G, Boizard H, 2009. The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil Till Res* 105 : 209-16.

Carof M, De Tournonet S, Coquet Y, Hallaire V, Roger-Estrade J, 2007. Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no tillage and the effect of three species of cover crop on in Northern France. *Agron Sustain Dev* 27 : 347-56.

Cerdan O, 2001. *Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés*. Thèse, université d'Orléans. [Téléchargeable sur www.inra.fr/ea/EA_these/fichier_these/OCerdan-BR.pdf].

Chaplain V, Défossez P, Richard G, Tessier D, Roger-Estrade J, 2011. Contrasted effects of no-till on bulk density of soil and mechanical resistance. *Soil Till Res* 111 : 105-14.

Chenu C, Le Bissonais Y, Arrouays D, 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci Soc Am J* 64 : 1479-86.

Colbach N, Debaecke P, 2000. Integrating crop management and crop rotation effects into models of weed population dynamics : a review. *Weed Sci* 46 : 717-28.

Colbach N, Meynard JM, Duby C, Huet P, 1999. A dynamic model of the influence of rotation and crop management on the disease development of eyespot. Proposal of cropping systems with low disease risks. *Crop Prot* 18 : 451-61.

Deurer M, Grinev D, Young I, Clothier BE, Müller K, 2009. The impact of soil carbon management on soil macropore structure: a comparison of two apple orchard systems in New Zealand. *Eur J Soil Sci* 60 : 945-55.

Doina N, Duntru N, 2009. *Conservation tillage on sloping land*. International Symposium "Prospects for the agriculture of the 21st Millennium", 25-27 oct. 2009, Cluj-Napoca, Bulgaria.

Döring TF, Brandt TM, Hess J, Finckh MR, Saucke H, 2005. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes. *Field Crop Res* 94 : 238-49.

- El Titi A, 2003. Tillage in Agroecosystems, the synthesis. In: El Titi A, ed. *Soil tillage in agroecosystems*. Boca Raton (Florida, États-Unis) : CRC Press.
- Findeling A, Ruy, S, Scopel E, 2003. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *J Hydrol* 275 : 49-66.
- Franzluebbers AJ, Arshad MA, 1996. Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in Northwestern Canada. *Soil Sci Soc Am J* 60 : 1422-7.
- Gruber W, Tebrügge F, 1990. *Influence of different tillage systems on trafficability and soil compaction*. Presented at International Summer Meeting, Paper No. 91-1090, St. Joseph (Michigan, États-Unis): Am Soc Agric Engineers.
- Guérif J, 1991. Simplification du travail du sol et évolution du milieu physique et chimique. *Perspectives Agricoles* 161 : 39-46.
- Guérif J, 1994. *Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface : conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportements mécaniques*. Colloque « Simplification du travail du sol ». Les colloques de l'Inra, N° 65. Paris : Inra éditions.
- Heddadj D, Gascuel-Oudou C, Cotinet P, Hamon Y, 2005. Mode de travail du sol, ruissellement et propriétés hydrodynamiques sur un dispositif expérimental de l'Ouest de la France. *Etude et Gestion des Sols* 12 : 53-66.
- Holland JM, 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agr Ecosyst Environ* 103 : 1-25.
- Kay BD, Vandendyngaert AJ, 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till Res* 66 : 107-18.
- Kreye H, 2004. Effects of conservation tillage on harmful organisms and yield of oilseed rape. Proceedings of the IOBC/WPRS Working Group "Integrated Control in Oilseed Crops", Rothamsted, UK, 30-31 March, 2004. *Bulletin OILB/SROP* 27 : 25-9. <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/1766801>.
- Kwaad FJPM, Van der Zijp M, Van Dijk PM, 1998. Soil conservation and maize cropping systems on sloping loess in the Netherlands. *Soil Till Res* 46 : 13-21.
- Lal R, Kimble J, Follett R, Cole C, 1998. *The potential US cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. Chelsea (Michigan, États-Unis) : Sleeping Bear Press.
- Lampurlanés J, Cantero-Martínez C, 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agron J* 95 : 526-36.
- Le Bissonnais Y, 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur J Soil Sci* 47 : 425-37.
- Le Bissonnais Y, Arrouays D, 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur J Soil Sci* 48 : 39-48.
- Leonard J, Richard G, 2004. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena* 57 : 233-49.
- Martin P, Joannon A, Piskiewicz N, 2010. Temporal variability of surface runoff due to cropping systems in cultivated catchment areas: use of the DIAR model for the assessment of environmental public policies in the Pays de Caux (France). *J Environ Manage* 91 : 869-78.
- Metay A, Mary B, Arrouays D, Labreuche J, Martin M, Nicolardot B, Germon JC, 2009. Effets des techniques culturales sans labour sur le stockage de carbone dans le sol en contexte climatique tempéré. *Can J Soil Sci* 89 : 623-34.
- Ouvry J, 1990. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré. Expérience du Pays de Caux (France). *Cah Orstom, Sér. Pédol* 25 : 157-69.
- Pagliai M, Vignozzi N, Pellegrini S, 2004. Soil structure and the effect of the management practices. *Soil Till Res* 79 : 131-43.
- Peigné J, Ball B, Roger-Estrade J, David C, 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use Manage* 23 : 129-44.
- Pelosi C, Bertrand M, Roger-Estrade J, 2009. Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agron Sustain Dev* 29 : 287-95.
- Pères G, Cluzeau D, Curmi P, Hallaire V, 1998. Earthworm activity and soil structure changes due to organic enrichments in vineyard systems. *Biol Fertil Soils* 27 : 417-24.
- Poesen J, Govers G, 1990. Gully erosion in the loam belt of Belgium: typology and control measures. In: *Soil erosion on agricultural land*. Proceedings of a workshop sponsored by the British Geomorphological Research Group, Coventry, UK, January 1989. Chichester (United Kingdom) : John Wiley & Sons Ltd.
- Quinton JN, Catt JA, 2004. The effects of minimal tillage and contour cultivation on surface runoff, soil loss and crop yield in the long-term Woburn Erosion Reference Experiment on sandy soil at Woburn, England. *Soil Use Manage* 20 : 343-9.
- Rasmussen KJ, 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: a Scandinavian review. *Soil Till Res* 53 : 3-14.
- Richard G, Boiffin J, Duval Y, 1995. Direct drilling of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) into a cover crop: effects on soil physical conditions and crop establishment. *Soil Till Res* 34 : 169-85.
- Richard G, Mary B, Boizard H, Roger-Estrade J, Chenu C, 2004. Impacts des techniques culturales sans labour sur le fonctionnement des sols cultivés: composantes physique et organique. In: *Techniques culturales sans labour*. Paris : éditions CORPEN.
- Rhoton FE, Shipilato MJ, Lindbo DL, 2002. Runoff and soil loss from midwestern and southeastern US silt loam soils as affected by tillage practice and soil organic matter content. *Soil Till Res* 66 : 1-11.
- Roger-Estrade J, Anger C, Bertrand M, Richard G, 2010. Tillage and soil ecology: Partners for a sustainable agriculture. *Soil Till Res* 111 : 33-40.
- Sasal MC, Andriulo AE, Taboada MA, 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Till Res* 87 : 9-18.
- Six J, Feller C, Denef K, Ogle SM, Moraes SA JC, Albrecht A, 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no tillage. *Agronomie* 22 : 755-75.
- Smith P, Powelson DS, Glendinning MJ, Smith JU, 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biol* 4 : 679-85.
- Soane BD, Ball BC, 1998. Review of management and conduct of long-term tillage studies with special reference to a 25-yr experiment on barley in Scotland. *Soil Till Res* 45 : 17-37.
- Suwardji P, Eberbach PL, 1998. Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf (Red Kandosol) after 16 years of direct drilling or conventional cultivation. *Soil Till Res* 49 : 65-77.
- Tebrügge F, Düring RA, 1999. Reducing tillage intensity: a review of results from a long term study in Germany. *Soil Till Res* 53 : 15-28.
- West TO, Post WM, 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci Soc Am J* 66 : 1930-46.
- Witmer G, Saylor R, Huggins D, 2007. Ecology and management of rodents in no-till agriculture in Washington, USA. *Integr Zool* 2 : 154-64.
- Wright SF, Starr JL, Paltineanu IC, 1999. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Sci Soc Am J* 63 : 1825-9.
- Yang XM, Kay BD, 2001. Impact of tillage practices on total, loose and occluded-particulate and humified organic carbon fractions in soils within a field in Southern Ontario. *Can J Soil Sci* 81 : 149-56.