

Impact des techniques culturales sans labour sur le fonctionnement biophysique des sols

Heddadj D., Cloarec M.

in

Bouzerzour H. (ed.), Irekti H. (ed.), Vadon B. (ed.).
4. Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct

Zaragoza : CIHEAM / ATU-PAM / INRAA / ITGC / FERT
Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 96

2011
pages 131-145

Article available on line / Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=801428>

To cite this article / Pour citer cet article

Heddadj D., Cloarec M. **Impact des techniques culturales sans labour sur le fonctionnement biophysique des sols**. In : Bouzerzour H. (ed.), Irekti H. (ed.), Vadon B. (ed.). *4. Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct*. Zaragoza : CIHEAM / ATU-PAM / INRAA / ITGC / FERT, 2011. p. 131-145 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 96)



<http://www.ciheam.org/>
<http://om.ciheam.org/>

Impact des techniques culturales sans labour sur le fonctionnement biophysique des sols

D. Heddadj et M. Cloarec

Pôle agronomie – Recherche Appliquée des Chambres d'agriculture de Bretagne
Avenue du Général Bognis Desbordes, BP 398, 56009 Vannes Cedex (France)

Résumé. Un dispositif expérimental a été mis en place depuis dix ans à la station de Kerguehennec (Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne) sur la base d'une rotation maïs/blé/colza/blé. Cet essai, dans le contexte de l'Ouest de la France, croise trois techniques de travail du sol (labour, L; travail superficiel, TS; et semis direct, SD) et deux types de fertilisation azotée (minérale, M; fumier de volailles, FV), chaque modalité est répétée trois fois. Ce dispositif a fait l'objet d'un suivi de l'évolution des caractéristiques du sol portant sur différents indicateurs : la porosité, la conductivité hydraulique, la stabilité structurale, la teneur en matière organique et les populations lombriciennes. Les résultats montrent que les techniques sans labour (TSL) connaissent une baisse de porosité globale sur la couche 0-25 cm, particulièrement dans le cas du semis direct. Bien que la densité et la biomasse lombricienne soient augmentées en non labour, la baisse de porosité n'est pas compensée. La conséquence en est la baisse de conductivité hydraulique, dans le cas du semis direct. Le travail superficiel du sol semble constituer le meilleur compromis, car il permet de maintenir voire d'améliorer l'infiltrabilité grâce à l'amélioration de la stabilité structurale dans la couche superficielle et la préservation des états de surface par la présence d'un mulch.

Mots-clés. Travail réduit – Porosité – Stabilité structurale – Conductivité hydraulique – Lombriciens.

Impact of no-tillage techniques on soil physical and biological performance

Abstract. *An experimental device has been set up for ten years at the Kerguehennec Experimental Station (Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne) located in Brittany (western France) on the basis of a corn/wheat/rape/wheat rotation. The study, in the western context of France, compares three tillage practices (moldboard plowing, surface tillage and no-tillage) and two nutrient sources (mineral and poultry manure), each management systems repeated three times. The aim of this study was to evaluate the effect of reduced tillage and manure fertilization on the evolution of soil characteristics: porosity, aggregate stability, organic carbon, hydraulic conductivity and earthworm populations. The results show that treatments without plowing know a decline of global porosity on the layer 0-25 cm, particularly in the case of the no-till. Although the abundance and biomass of earthworms are increased in reduced tillage, the decrease of porosity is not compensated. The consequence is the decline of hydraulic conductivity, in the case of the no-till. Surface tillage seems to constitute the best compromise, because it maintains or improves the infiltrability thanks to the improvement of aggregate stability in the surface layer and the protection of soil surface by the presence of a mulch.*

Keywords. *Reduced tillage – Porosity – Aggregate stability – Hydraulic conductivity – Earthworms.*

I – Introduction

De nombreux travaux montrent que le remplacement du labour par un travail simplifié entraîne une augmentation de la densité du sol. En conséquence, la porosité totale diminue en non travail du sol dès les premières années de la mise en place du système (Guéris, 1994 ; Rasmussen, 1999 ; Maillard *et al.*, 1995). La distribution de la taille des pores serait modifiée : la taille des macropores (>30 µm) diminue, celle des mésopores (30-0,2 µm) augmente et celle des micropores (<0,2 µm) ne change pas (Rasmussen, 1999) ou augmente légèrement (Azooz et Arshad, 1996). Eynarda *et al.* 2004 pensent que c'est un indicateur d'une augmentation du rôle de l'activité biologique dans la formation des pores. Tebrügge et Düring (1999) montrent

que le labour crée artificiellement une grande proportion (50%) de pores supérieurs à 120 µm dont le volume diminue rapidement durant la période hivernale, ce qui fait baisser la porosité totale. Le non-travail conserve une porosité totale plutôt constante voire en légère augmentation ; la gamme de pores supérieurs à 120 µm évoluant vers des pores compris entre 30 et 0,2 µm sur l'horizon 14-24 cm. Néanmoins, il est souvent observé, après quelque années, une augmentation progressive de la porosité structurale en non labour jusqu'à un niveau de pseudo-équilibre restant inférieur au labour (Stengel, 1986 ; Guerif, 1994). Ceci serait dû à la combinaison de facteurs climatiques comme l'alternance de périodes d'humectation-dessiccation qui crée une porosité fissurale, et de facteurs biologiques par l'augmentation de l'activité lombricienne qui crée une porosité tubulaire (Maillard *et al.*, 1997 ; Rasmussen, 1999).

L'effet améliorateur de l'activité lombricienne par l'arrêt du travail du sol a souvent été décrit (Leulier, 1996). Le non labour engendre une sélection des espèces lombriciennes. Les espèces anéciques (dont *Lumbricus terrestris*, qui forme généralement de grandes galeries profondes et verticales) sont favorisées en non labour par rapport au labour (Rasmussen, 1999) car les galeries sont permanentes alors qu'elles sont détruites par le labour. C'est également le cas des épigés (vers de petite taille qui vivent plutôt en surface dans les débris organiques du sol) car les techniques sans labour concentrent les débris végétaux en surface. Cette augmentation d'activité lombricienne peut avoir deux effets : l'augmentation de la porosité tubulaire constituée de galeries et de la porosité dite d'assemblage. Plus le travail est minimal plus le nombre et la biomasse de lombriciens sont importants. Peres (2003) montre néanmoins que la densité des acteurs biologiques n'est pas directement liée au nombre de pores observés dans les profils. Ainsi la densité de lombriciens ne serait pas liée à la porosité observée. L'étude met aussi en avant le rôle majeur de l'entretien des galeries par la présence de lombriciens pour leur pérennité et leur fonctionnement. L'étude montre aussi que la densité et la longueur des pores ne sont pas des indicateurs de mouvements d'eau dans le profil. Toutefois, la connectivité des galeries et leur continuité influencent la perméabilité du sol sachant que c'est l'état de surface et son rôle sur l'ouverture des pores qui sont des facteurs préalables à une bonne conductivité hydraulique. L'apport de fumier ainsi que l'allongement des rotations avec notamment la présence de légumineuse augmentent aussi les populations de lombrics (Jordan et Miles, 2004). Néanmoins, le dénombrement des lombriciens reste problématique au vu de l'hétérogénéité spatiale de leur répartition (Whalen et Costa, 2003) et de la variation temporelle de leur activité.

La structure d'un sol, et notamment sa porosité est un facteur influant sur la capacité de ce sol à infiltrer l'eau. Les arguments favorables aux TSL en termes d'infiltration de l'eau sont que la porosité formée naturellement est plus persistante et plus interconnectée que la porosité créée par un travail mécanique du sol. Ainsi, même si la porosité reste globalement inférieure, elle peut s'avérer plus efficace en termes d'écoulement d'eau grâce à une restructuration naturelle d'origine climatique et biologique (Peres, 2003). Mais force est de constater que dans des conditions pédologiques proches de celles de la Bretagne, les résultats en termes de conductivité hydraulique sont assez divers notamment du fait de la grande variabilité des sols, des rotations étudiées, des modalités de travail du sol utilisées ainsi que des méthodes de mesure de la conductivité hydraulique. Certaines études sont même difficiles à comprendre. Si l'on ajoute à cela l'absence générale de précision sur la date de mesure (cumul pluviométrique, intensité des pluies et délais après semis) les interprétations deviennent très difficiles. On comprend bien par ces exemples les difficultés à dégager des tendances claires à partir des études portant sur le sujet, à cause du caractère spécifique de chaque étude et du manque de précision sur des facteurs primordiaux en jeux dans le phénomène d'infiltration. Qui plus est, des études récentes (Heddadj *et al.*, 1999 ; Hallaire *et al.*, 2004) ont mis en évidence d'importantes variations de conductivité hydraulique au cours d'une même saison culturale

Le stock de carbone a tendance à augmenter quelques années après la conversion en TSL (Duiker et Beegle, 2005 ; Bernoux *et al.*, 2006 ; Rasmussen, 1999 ; Guerif, 1994 ; Holland, 2004 ; West et Post, 2002). L'augmentation des teneurs en carbone n'est pas continue, les essais de longue durée ont montré que chaque système atteint un équilibre, avec un stock de

carbone plus important en TSL et plus faible en labour (West et Post, 2002). Ces derniers montrent que la réduction du travail du sol et l'allongement de la rotation permettent d'augmenter les stocks de carbone par des facteurs de 1,16 et 1,07 respectivement. Selon leur étude se basant sur 67 essais de longue durée à travers le monde, il n'y a pas ou peu de séquestration dans les 2 à 5 premières années de conversion. Le pic se produit entre 5 et 10 ans après le passage en « non-labour » et l'équilibre est atteint au bout de 15 à 20 ans. Balesdent (2002) fait état d'un stockage moyen annuel de 0,2 t de carbone par hectare pendant 20 ans pour la France quel que soit le type de non-labour sans tenir compte de l'impact d'une éventuelle décompaction. Smith (2004) fait état de 0,38 tC/ha/an pour les pays de l'EU15 avec une incertitude de 50%.

La répartition verticale du carbone serait également influencée par les modes de travail du sol. En labour, les teneurs en carbone sont homogènes dans l'horizon retourné puis diminuent sur le reste du profil ; en travail superficiel et en non-travail, le carbone est concentré en surface puis diminue rapidement avec des taux inférieurs à ceux obtenus en labour sur l'ancien horizon travaillé (Guérif, 1994) ou des taux comparables (Rasmussen, 1999 ; Tebrügge et Düring, 1999 ; Franzluebbers, 2001a ; Piovanelli *et al.*, 2005 ; Maillard *et al.*, 1994). Guérif (1994) pose la double hypothèse que le non-travail peut limiter l'évolution des résidus du fait de leur localisation en surface (limitation du contact sol/résidu, donc limitation de l'action minéralisatrice des micro-organismes) alors que le labour conventionnel favorise une intense activité microbienne. Reicosky (2001) a montré que l'émission de CO₂ est proportionnelle à l'ouverture et à la fragmentation du sol. Les systèmes les plus travaillés (labour, travail profond) perdent de ce fait plus de carbone que le travail réduit, le semis direct étant la modalité la moins émettrice.

Les caractéristiques d'un sol influençant sa stabilité structurale sont la texture, la teneur en matière organique, la minéralogie des argiles, les cations, les oxydes de fer et d'aluminium, le carbonate de calcium. Dans les régions tempérées d'Europe de l'Ouest, c'est la matière organique qui joue le rôle le plus important (Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Ainsi, l'apport de fumier et le mulchage des résidus améliorent la stabilité structurale (Bronick et Lal, 2004). La conversion en TSL conduit à une augmentation de la stabilité structurale de la couche superficielle (Rasmussen, 1999 ; Pagliai, 2004 ; Maillard *et al.*, 1995). Tebrügge et Düring (1999) ont notamment mesuré le rôle du travail du sol sur la stabilité en fonction du taux d'argile : il s'avère que les pratiques ont une influence pour des teneurs en argile inférieures à environ 30% . Chenu *et al.* (2000) pensent que l'augmentation est liée à la concentration de la matière organique en surface. D'autres auteurs montrent aussi une corrélation entre la stabilité et le taux de carbone (Ball *et al.*, 1996 ; Pagliai, 2004). Six *et al.* (1999) pensent aussi que la destruction mécanique des agrégats lors du labour (ou de différents travaux du sol) est une cause de la dégradation de la stabilité structurale, provoquant aussi un dégagement de carbone (CO₂).

L'objectif de ce travail était, après 8 années de différenciation, de mesurer l'impact des techniques de travail du sol, de la fertilisation et de leurs interactions sur certains indicateurs de la structure du sol dans le contexte de l'Ouest de la France.

II – Matériels et méthodes

1. Le site d'étude

Le site est situé à la station expérimentale de Kerguéhennec, en Bretagne à l'Ouest de la France. Le sol, développé sur micaschiste, est un cambisol humique (FAO), moyennement profond à profond avec une texture limono-sableuse et une teneur en matière organique relativement élevée sur les 25 premiers cm (Tableau 1). Le climat est océanique avec une température moyenne annuelle de 10°8 C et une pluviométrie moyenne de 890 mm. L'essai mis en place en 2000 est un dispositif en split plot avec 3 répétitions comprenant comme facteur principal 3 techniques de travail du sol et 2 fertilisants comme facteur secondaire. Les

dimensions de chaque parcelle élémentaire sont de 25 m de long sur 12 m de large. Chacune des modalités est répétée 3 fois. La rotation pratiquée est maïs-blé-colza-blé-couvert (phacélie). Les techniques de travail du sol comparées sont le labour (L) avec un travail du sol à la charrue à 25 cm de profondeur, le travail superficiel (TS) à 12 cm, le semis direct (SD) avec un travail minimum sur la ligne de semis (SD). Pour les 2 premières modalités un lit de semences est préparé sur toute la surface avec une herse rotative à une profondeur de 5 cm. Ces différentes techniques sont associées à deux types de fertilisants : le fumier de volailles (FV) et l'ammonitrate (M) appliqués chaque année et dont les quantités sont calculées sur la base d'un bilan prévisionnel annuel. Dans le cas du FV, un apport complémentaire d'ammonitrate est réalisé si nécessaire.

Tableau 1. Caractéristiques physiques du sol

Profondeur	Diamètre particules (%)					pH	MO (%)
	< 2µm	2-20 µm	20-50 µm	50-200 µm	200-2000 µm		
0-25 cm	16,6	23,3	19,1	26,0	15,0	6,0	4,3
25-40 cm	16,0	25,0	17,9	26,5	14,4	5,4	2,5
40-80 cm	13,7	19,9	15,7	28,0	21,6	5,0	1,2

2. Les méthodes

A. La porosité

Elle est évaluée par des mesures de densité apparente qui sont réalisées à l'aide d'un cylindre de 251,2 cm³ de volume prélevés à 0-5 et 10-20 cm de profondeur. Les échantillons ont été prélevés tous les ans de 2000 à 2008. Après passage à l'étuve à 105°C pendant 48 heures, l'humidité pondérale (H_p) et la densité apparente (D_{app}) sont calculées à partir des poids humide et sec ainsi que du volume de terre prélevé. La densité réelle D_r est la densité du sol sec, constituant la fraction solide indépendante des pores ; sa valeur moyenne sur les sols de Bretagne est de 2.65 (Duchaufour, 2001).

$D_{app} = \text{Poids sec} / \text{Volume du cylindre (g/cm}^3\text{)}$

$H_p = (\text{Poids humide} - \text{Poids sec}) / \text{Poids sec} \times 100$

La porosité totale est alors égale à : $P_{tot} = [(D_r - D_{app}) / D_r] \times 100$

B. Le carbone

Les sols ont été échantillonnés en mars 2008, après la récolte du blé et avant les épandages et le travail du sol pour le semis du maïs. Quatre sites de prélèvement ont été déterminés par parcelle élémentaire pour échantillonner le profil de sol à 6 profondeurs (0-5, 5-15, 15-20, 20-25, 25-30, et 30-40 cm). Les échantillons ont été mélangés pour constituer un échantillon composite par profondeur, représentatif de la parcelle élémentaire. Un sous-échantillon a été séché à l'air, tamisé à 2 mm et broyé à 10 µm pour la détermination de la teneur en C. La teneur en C a été analysée par combustion sèche.

C. La stabilité structurale

Des échantillons ont été prélevés et analysés en 2000 à la mise en place de l'essai et en 2007 selon la méthode décrite par Le Bissonnais (Le Bissonnais *et al.*, 1995). L'objectif de cette méthode est de donner une description réaliste du comportement du sol soumis à l'action de la pluie, et de permettre un classement relatif des matériaux. Les échantillons prélevés sont séchés à l'air libre, désagrégés puis tamisés pour sélectionner des agrégats de 3 à 5 mm. Juste

avant les tests, les agrégats sont mis à l'étuve à 40°C pendant 24 h pour uniformiser les conditions de traitement. Le sol est soumis à trois traitements : (i) un traitement d'humectation rapide par immersion permet de tester le comportement de matériaux secs soumis à une humectation rapide (traitement à l'eau) ; (ii) un traitement d'humectation lente par capillarité permet de tester le comportement de matériaux secs ou peu humides soumis à des pluies modérées (traitement à l'éthanol) ; et (iii) un traitement de désagrégation mécanique par agitation après réhumectation permet de tester le comportement de matériaux humides (réhumectation).

Pour chacun des traitements, les échantillons sont soumis à une désagrégation et la distribution de la taille des particules résultantes est mesurée. On mesure le pourcentage de chaque classe de taille par rapport au poids total d'agrégats. On calcule ensuite le poids moyen pondéral après désagrégation (MWD : Mean Weight Diameter) en mm : $MWD = \sum (\% \text{ de la fraction par rapport au poids total} \times \text{diamètre moyen de la fraction})$. On calcule également la moyenne des MWD des trois traitements.

D. La conductivité hydraulique

La méthode choisie pour mesurer cette conductivité hydraulique est l'infiltromètre à disque (TRIMS : Triple Ring Infiltrometer at Multiple Succions) ou encore infiltromètre multidisque. Elle permet de mesurer la valeur de la conductivité hydraulique en conditions proches de la saturation $[K(h)]$ d'un sol de manière assez rapide et non destructrice (Thony *et al.*, 1991) à différents potentiels sous charge négative (Clothier *et al.*, 1993 ; Clothier *et al.*, 1981 ; Perroux *et al.*, 1988). Elle a été mesurée avec un infiltromètre multidisques (TRIMS) de 80 mm de diamètre de base en contrôlant la tension à la surface du sol tel que décrit dans Ankeny *et al.* (1990,1991).

La conductivité hydraulique insaturée a été évaluée à partir de différentes mesures de potentiel avec le même disque selon la méthode proposée par Reynolds et Elrick (1991) et Ankeny *et al.* (1991). Une approche mathématique de l'écoulement en régime permanent à partir d'une source circulaire permet de calculer $K(h)$ (Wooding, 1968).

Les mesures ont été réalisées à différentes périodes de l'année durant le cycle cultural des cultures de la rotation pour prendre en compte la variabilité intra-annuelle de ce paramètre (Heddadj *et al.*, 1999).

E. Les vers de terre

Les communautés lombriciennes ont été déterminées dans chaque parcelle élémentaire suivant la méthode au formol associée à un tri manuel (Cluzeau *et al.*, 1999). Elle est basée sur le comportement de fuite vers la surface des vers de terre lorsque leur épiderme est excité par une substance chimique, ici du formol.

Ces prélèvements ont été réalisés sur des placettes de 1 m² et répétés 3 fois dans chacune des parcelles élémentaires. Après 3 épandages successifs d'eau formolée, un tri manuel est effectué sur un bloc de terre correspondant à 1/16 de m² sur une profondeur de 20 cm

Les valeurs corrigées de population lombricienne se basent donc sur le nombre de vers récoltés sur ce volume de sol par la relation : Valeurs corrigées = (Formol+Grattage léger, sur 1m²) + 16 x Tri manuel (sur 1/16 de m²)

Les vers de terre ainsi récupérés sont identifiés, dénombrés et pesés. Des données ont été acquises en 2001, 2003, 2005 et 2007 sur culture de blé ; ces prélèvements sont réalisés en période printanière.

F. Analyses statistiques

Des analyses de variances ont été réalisées à partir du logiciel R pour tester l'effet du travail du

sol, de la fertilisation et de leurs interactions sur la porosité, l'abondance lombricienne, la stabilité structurale et la conductivité hydraulique.

III – Résultats et discussion

Les résultats présentés ci-dessous concernent les années 2004 à 2008, c'est-à-dire la dernière rotation complète réalisée à Kerguéhennec. L'essai ayant débuté en 2000, on ne s'intéresse pas à la première rotation 2000-2004 qui constitue une période de transition dans l'évolution du dispositif.

1. Porosité totale

De manière générale, les plus fortes valeurs de densité apparente sont obtenues pour la modalité SD (1,28 g.cm⁻³ en surface, 1,36 g.cm⁻³ en profondeur) tandis que les plus faibles valeurs sont obtenues en L (1,13 g cm⁻³ en surface, 1,19 g.cm⁻³ en profondeur). Sous TS les valeurs sont aussi basses que celles de L sur les 10 premiers centimètres et aussi élevées que celles de SD à 10 cm, respectivement 1,17 g cm⁻³ et 1,35 g.cm⁻³ (Fig. 1). L'effet travail du sol est significatif (p<0.001) sauf en surface entre TS et L et en profondeur entre TS et SD dont les valeurs sont semblables.

Ainsi, L a les plus fortes valeurs de porosité (57% à 0-10cm, 55% à 10-20 cm) tandis que SD a les plus faibles valeurs (52% en surface, 49% en profondeur). Sous TS les valeurs sont aussi élevées que celles de L sur les 10 premiers centimètres (55%) et aussi basse que celle de SD à 10 cm (49%). L'absence de travail du sol depuis la mise en œuvre de l'essai conduit à une baisse de 6% de la porosité des horizons non travaillés : pour la couche 10-20 cm, la porosité est de 55% en L contre 49% en TS et SD (Tableau 2).

En surface, on observe des écart-types importants, principalement pour la modalité TS, reflétant des variations saisonnières et inter annuelles de la porosité (4,61 en TS, 2,58 en L, 2,79 en SD). L'effet fertilisation sur la porosité du sol n'est pas significatif (p-value=0,76). La porosité est de 53% en M et FV quel que soit le type de travail du sol (Fig. 2).

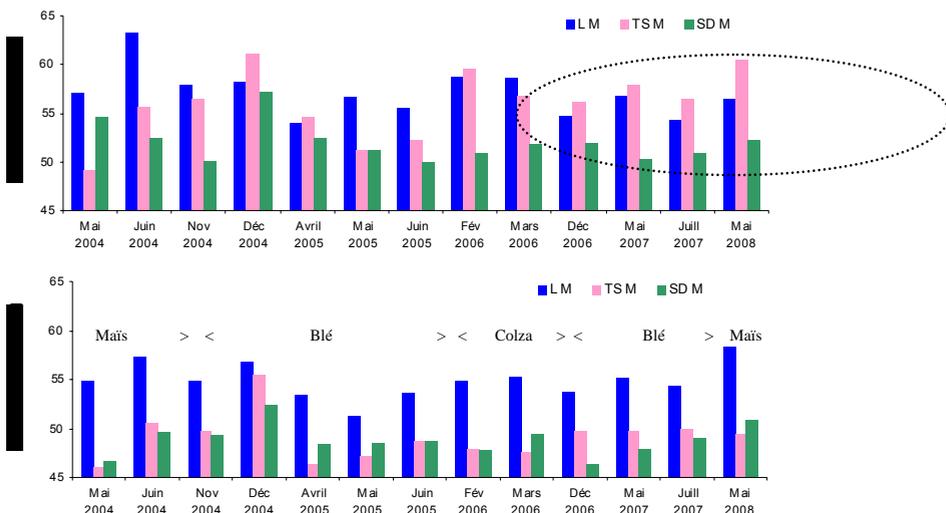


Fig. 1. Evolution de la porosité totale de mai 2004 à mai 2008 [maïs-blé-colza-blé-(phacélie)-maïs] en surface (graphique du haut) et de 10 à 20 cm de profondeur (graphique du bas) selon le type de travail du sol.

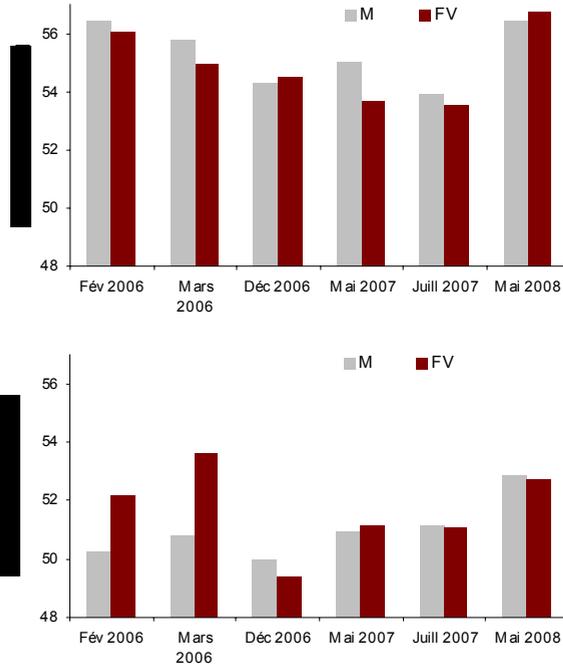


Fig. 2. Evolution de la porosité totale de mai 2004 à mai 2008 (maïs-blé-colza-blé-(phacélie)-maïs) en surface (premier graphique) et de 10 à 20 cm de profondeur (deuxième graphique) selon le type de fertilisation.

Tableau 2. Comparaison des moyennes de densité apparente et de porosité totale, de février 2006 à mai 2008, sous fertilisation minérale et fumier de volailles pour l'horizon 0-20 cm. *Ecart-types en italique*

	Densité apparente (g.cm ⁻³)	Porosité totale (%)
Travail du sol		
L	1,16 (0,07)	56,2 (2,58)
TS	1,26 (0,13)	52,0 (4,61)
SD	1,32 (0,07)	50,4 (2,79)
Fertilisation		
M	1,24 (0,10)	53,1 (3,90)
FV	1,24 (0,10)	53,3 (3,68)

2. Le carbone

Dans le cas du labour, les concentrations en C sont relativement homogènes dans les 25 premiers cm puis diminuent dans les couches plus profondes. Dans les modalités SD et TS les concentrations sont plus élevées dans les 2 premières couches 0-5 cm et 5-10 cm (Fig. 3). Des concentrations plus importantes sont mesurées en SD et TS dans la couche 0-5 cm ($p=0,029$), et des concentrations plus élevées sont aussi mesurées dans celle 5-15 cm en TS par rapport à

L et SD ($P=0,033$). Dans la couche 20-25 cm, la tendance est inversée : L présente des concentrations en C plus élevées ($20,8 \text{ gC.kg}^{-1}$) que SD et TS ($19,6$ et $19,2 \text{ gC.kg}^{-1}$ respectivement) ($p=0,020$). Aucune différence entre modalités n'est mesurée dans les niveaux plus profonds.

Bien que l'effet de la fertilisation ne soit pas significatif, la concentration en C est en moyenne plus élevée en fertilisation organique qu'en fertilisation minérale sur l'ensemble des 25 premiers cm.

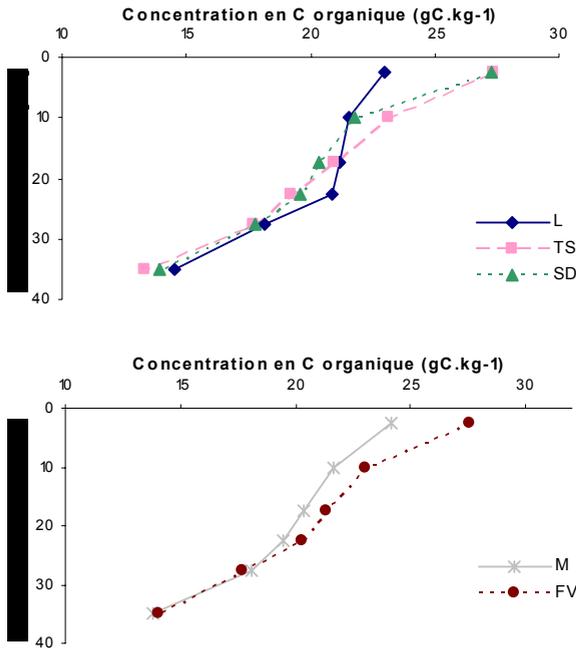


Fig. 3. Profils des concentrations moyennes en C du sol par type de travail du sol (en haut) et par type de fertilisation (en bas).

3. Stabilité structurale

De manière générale, les sols labourés ont une stabilité structurale inférieure (1,56 mm) aux sols sous TS et SD, respectivement 1,76 mm et 1,78 mm (Fig. 4) mais l'effet travail du sol n'est pas significatif ($p\text{-value}=0,87$).

La stabilité a globalement augmenté entre 2000 et 2007, principalement en SD : +0.50 mm (Tableau 3). On peut noter, en 2007, une variabilité inter-mensuelle avec une tendance à une augmentation de la stabilité structurale entre avril et juillet.

Bien que l'effet fertilisation ne soit pas significatif, la stabilité structurale est en moyenne plus élevée sous fumier de volailles (1,75 mm) que sous fertilisation minérale (1,64 mm).

Globalement, quel que soit le type de travail du sol et la nature du fertilisant, les sols étudiés peuvent être qualifiés de stables (MWD entre 1,3 et 2.0 mm) avec une tendance à une stabilité plus forte en non labour et en fertilisation FV.

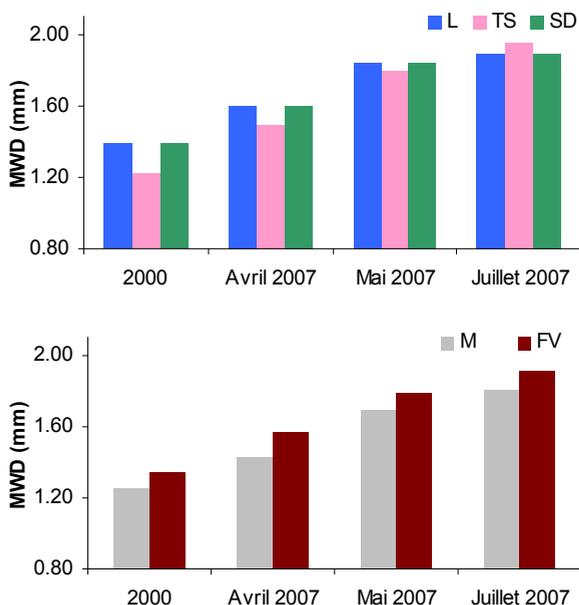


Fig. 4. Evolution de la stabilité structurale (MWD moyenne des 3 tests) à 0-5 cm en 2000 et 2007 par type de travail du sol et de fertilisation.

Tableau 3. Comparaison des moyennes de stabilité structurale (mm) de 2000 et 2007-2008 (test eau+éthanol+réhumectation), sous fertilisation minérale et fumier de volailles. *Ecart-types en italique*

	MWD moyenne des 3 tests (mm)			
	2000	Classe	2007	Classe
Travail du sol				
L	1,29	Stable	1,56 (0,12)	Stable
TS	1,22	Stable	1,76 (0,20)	Stable
SD	1,39	Stable	1,78 (0,12)	Stable
Fertilisation				
M	1,25	Moyennement stable	1,64 (0,16)	Stable
FV	1,34	Stable	1,75 (0,14)	Stable

4. Les lombriciens

La densité de ver de terre est en moyenne plus forte sous SD (158 individus/m² en M, 281 en FV) que sous TS (117 individus/m² en M, 183 en FV) (p=0.04) et L (89 individus/m² en M, 182 en FV) (p=0.01) (Tableau 4). La différence n'est cependant pas significative entre ces deux dernières modalités de travail du sol. La part d'espèces endogées est la plus forte sous L (80%) comparée au TS (60%) et SD (52%). En revanche, la part d'espèces anéciques est plus forte sous SD (36%) et TS (32%) comparée au L (15%). La population de lombriciens semble avoir augmenté en 7 ans de non labour : multipliée par 1,7 en L, 2,5 en TS et 3,9 en SD (Fig. 5).

Tableau 4. Comparaison de l'abondance et de la part de chaque espèce lombricienne pour 4 années de mesure de 2001 à 2007, sous fertilisation minérale et fumier de volailles

	Abondance (ind/m ²)	Part d'endogées (%)	Part d'anéciques (%)	Part d'épigés (%)
Travail du sol				
L	135 c	80	15	5
TS	150 c	60	32	8
SD	220 a	52	36	11
Fertilisation				
M	121	60	30	10
FV	215	68	26	6

Les moyennes, dans chaque colonne pour un même paramètre, indiquées par une lettre identique n'étaient pas significativement différentes selon le test de Welch.

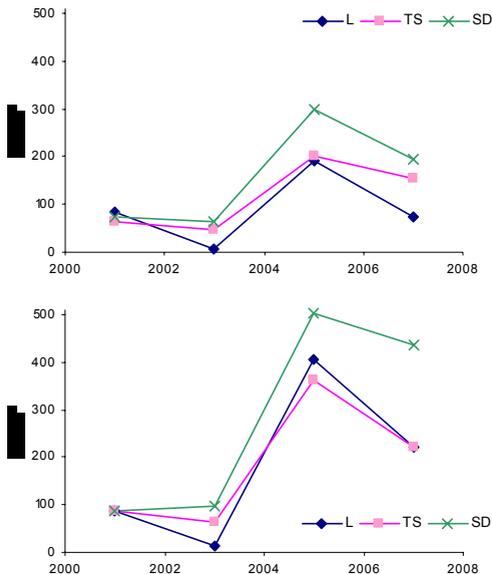


Fig. 5. Abondance par m² sous fertilisation minérale (graphique en haut) et fumier de volailles (graphique en bas).

L'effet fertilisation n'est pas significatif ($p\text{-value}=0,07$) mais FV semble avoir un effet amplificateur sur l'abondance de lombriciens (215 individus/m² sous FV, 121 sous L) ; la répartition des espèces ne semble pas affectée.

Ainsi, après sept ans d'essai, l'évolution des populations de lombriciens confirme celles constatées dans de nombreux travaux. La population et surtout la biomasse de lombriciens sont supérieures en TSL (Brown, 2003 ; Rasmussen, 1999), la part des anéciques de grosse taille augmentant particulièrement (Maillard et Cuendet, 1997). La variabilité annuelle liée aux facteurs climatiques est très importante (Whalen et Costa, 2003). L'apport de MO fraîche comme le fumier de volaille favorise les lombriciens (Jordan et Miles, 2004).

5. Conductivité hydraulique

De 2005 à 2007, la conductivité hydraulique $K(h)$ est nettement supérieure sous TS par rapport à celle sous L et SD, respectivement $121,1 \text{ mm.h}^{-1}$, $75,5 \text{ mm.h}^{-1}$, $45,7 \text{ mm.h}^{-1}$ (Fig. 6) avec un effet significatif du travail du sol sur la conductivité ($p\text{-value}=0,04$). Néanmoins, les écart-types sont importants, reflétant des variations saisonnières et inter-annuelles relativement importantes (41,23 pour L, 34,64 pour TS et 20,16 pour SD). Ces variations seraient liées à des modifications des états structuraux et de la porosité des sols (cf. III.3 et III.1).

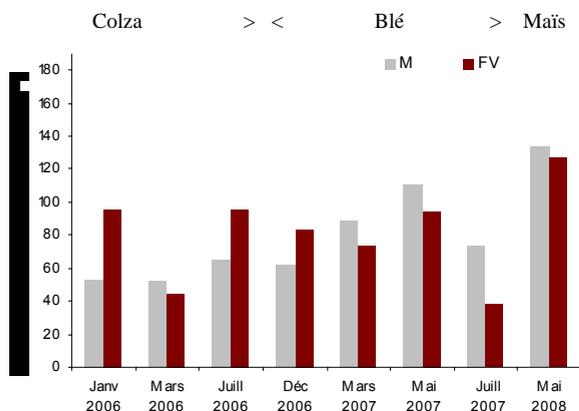
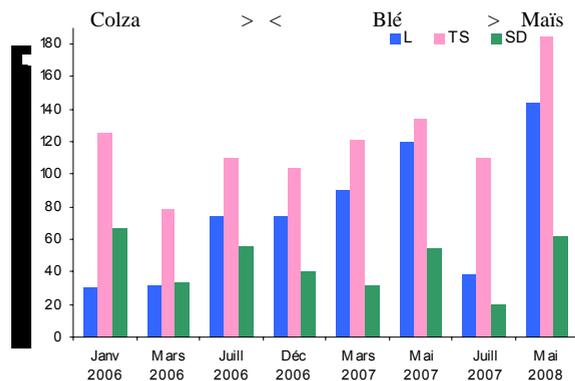


Fig. 6. Evolution de la conductivité hydraulique de surface de janvier 2006 à mai 2008 (colza-blé-maïs) par type de travail du sol et de fertilisation minérale.

Malgré une porosité forte, le labour ne permet pas d'atteindre une conductivité hydraulique aussi élevée que le TS. Ceci peut être dû aux effets combinés de : (i) la protection de la surface par les résidus qui limitent la fermeture de la porosité de surface ; et (ii) l'incorporation en surface de la matière organique qui améliore la stabilité structurale (cf. III.3) et limite l'effet de prise en masse. La porosité fonctionnelle est ainsi préservée.

L'effet fertilisation n'est pas significatif ($p\text{-value}=0,84$) pour la conductivité hydraulique ; elle est de 80 mm.h^{-1} en M et 82 mm.h^{-1} en FV, quel que soit le type de travail du sol (Tableau 5).

Tableau 5. Comparaison des moyennes de conductivité hydraulique (mm.h^{-1}), du 18 janvier 2006 au 1 mai 2008, sous fertilisation minérale et fumier de volailles. *Ecart-types en italique*

Travail du sol		Fertilisation	
L	75,5 (<i>41,23</i>)	M	79,9 (<i>48,14</i>)
TS	121,1 (<i>34,64</i>)	FV	81,6 (<i>42,57</i>)
SD	45,7 (<i>20,16</i>)		

IV – Discussion

1. Quel est l'impact des pratiques culturales sur la porosité du sol et de sa capacité à infiltrer ?

Les résultats montrent que la macroporosité est plus importante dans les sols travaillés.

Depuis l'arrêt du travail du sol, le semis direct a perdu 6% de porosité sur les 25 premiers cm comparativement au labour ; c'est aussi le cas du travail superficiel dans la couche sous-jacente 10-25 cm. Cette porosité connaît une baisse au cours du cycle cultural lorsque le sol est travaillé, depuis la préparation du sol jusqu'à la récolte. Elle est principalement due à 3 processus de modifications de la structure du sol : (i) l'évolution des états de surface, (ii) la prise en masse du sol sous l'effet de la pluie et (iii) la fragmentation du sol et l'agréation due à l'activité biologique (Heddadj, 1999 ; Bottinelli, 2010).

Dans le cas du semis direct, la porosité connaît une certaine stabilité liée à un volume de macroporosité relativement plus faible.

Ces processus affectent principalement la macroporosité. Cela explique la baisse de conductivité hydraulique dans le cas du labour et du travail superficiel. Si elle est plus élevée dans le cas des modalités avec travail du sol, elle connaît une décroissance relativement rapide au cours du temps sous l'effet des pluies.

L'apport de fumier de volailles n'influence pas la porosité totale. En conséquence, les valeurs de conductivité hydraulique ne sont pas influencées par le type de fertilisation.

2. L'activité lombricienne compense-t-elle la baisse de porosité en non labour ?

En semis direct, la macroporosité est réduite alors que l'abondance et la biomasse lombricienne y sont les plus importantes. L'activité induite par cette technique engendre deux fois plus de galeries que dans les modalités travaillées (Bottinelli, 2010). Pour autant cette augmentation de galeries n'est pas suffisante pour rendre le sol aussi perméable que lorsque le sol est travaillé. Pourtant de nombreux auteurs indiquent que les galeries agissent comme des voies préférentielles de l'eau sans pour autant que la macroporosité soit augmentée (Ehlers, 1975 ; Capowiez, 2000).

Les valeurs de $K(h)$ sont pourtant les plus élevées sous travail superficiel, les plus faibles sous semis direct et intermédiaires sous labour. Ce classement correspond bien aux données de porosité, si l'on compare globalement les modalités travaillées à celle en semis direct. Toutefois, la meilleure valeur de $K(h)$ en travail superficiel est liée à une meilleure stabilité structurale en surface ainsi qu'à la préservation des résidus qui limite la fermeture de la porosité en surface.

3. Quelle est l'impact des techniques de travail du sol sur l'évolution de la stabilité structurale ?

L'évolution de la stabilité structurale vis-à-vis de l'eau a été caractérisée grâce à des mesures réalisées au démarrage de l'essai en 2000 et à des mesures effectuées en 2007. Les sols pouvant être qualifiés de moyennement stables à stables ont vu malgré tout leur stabilité structurale s'améliorer par l'effet de concentration du carbone dans la couche de surface. Cet effet du non labour sur la stabilité de la structure du sol en surface est bien établi (Angers *et al.*, 1993). Cette amélioration est à mettre en relation avec l'évolution des teneurs en matière organique dans les couches de surface. Ces observations de concentration du carbone concordent avec d'autres études réalisées montrant une stratification du carbone et une concentration en surface après quelques années en non-labour (Guérif, 1994 ; Rasmussen, 1999 ; Tebrügge et Düring, 1999 ; Franzluebbers, 2001a).

Par ailleurs, nos travaux ont mis en évidence une forte variabilité intra-annuelle de la stabilité structurale, caractérisée par une augmentation au printemps et en été et une diminution en hiver (Chan *et al.*, 1994 ; Daraghmech *et al.*, 2009 ; Bottinelli, 2010).

Concernant la fertilisation aucun effet significatif n'a été mis en évidence ni sur les teneurs en carbone, ni sur la stabilité structurale.

V – Conclusion

Huit ans de pratiques différentes de travail du sol ont eu un impact fort sur la structure du sol. En moyenne, toutes dates de prélèvement confondues, la porosité totale est plus élevée en labour et en travail superficiel comparé au semis direct. Il en est de même pour la conductivité hydraulique. Bottinelli (2009) ajoute que l'effet de la macroporosité du sol sur les dynamiques de K(h) est dépendant du type de travail de sol. En 2007, sous labour et travail superficiel, les variations temporelles de K(h) étaient significativement et positivement corrélées avec la macroporosité du sol, particulièrement dues aux pores complexes et la petite et moyenne porosité. Sous semis direct, aucune relation significative n'a été observée entre la macroporosité du sol et K(h).

A l'inverse, toutes dates de prélèvement confondues, la stabilité structurale est plus élevée et les lombriciens plus nombreux sous TSL que sous labour. L'effet travail du sol est significatif pour la porosité et la conductivité hydraulique mais pas pour l'abondance lombricienne ni pour la stabilité structurale. La fertilisation organique ne semble pas avoir d'effets significatifs sur les différents indicateurs de structure du sol mais on note une tendance en fertilisation organique à une augmentation de la porosité, de la stabilité structurale, et de l'abondance lombricienne. Le TS semble donc offrir le meilleur compromis avec une porosité moyenne, une stabilité forte, une population lombricienne importante, avec pour conséquence une conductivité hydraulique la plus élevée des trois techniques de travail du sol.

Références

- Ahl C., Joergensen R.G., Kandeler E., Meyer B. et Woehler V., 1998. Microbial biomass and activity in silt and sand loams after long-term shallow tillage in central Germany. Dans : *Soil & Tillage Research*, 49, pp.93-104.
- Angers D.A., Samson, N. et Legere A., 1993. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. Dans : *Can. J. Soil Sci.*, 73(1), pp. 51-59.
- Anken T., Weisskopf P., Zihlmann U., Forrer H., Jansa J. et Perhacova K., 2004. Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. Dans : *Soil & Tillage Research*, 78, pp. 171-183.
- Azooz R.H. et Arshad M.A., 1996. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. Dans : *Canadian Journal of Soil Science*, 96, pp.143-152.

- Baker J.M., Ochsner T.E., Venterea R.T. et Griffis T.J., 2006.** Tillage and soil carbon sequestration – What do we really know ? Dans : *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, p. 1-5.
- Balesdent J., 2002.** Estimations chiffrées, par unité de surface, du stockage de carbone dans le sol associé aux changements de pratiques agricoles. Expertise INRA. Stocker du carbone dans les sols agricoles, pp. 115-200.
- Ball B.C., Cheshire M.V., Robertson E.A.G. et Hunter E.A., 1996.** Carbohydrate composition in relation to structural stability, compatibility and plasticity of two soils in a long-term experiment. Dans : *Soil & Tillage Research*, 39, pp. 143-160.
- Bernoux M., Cerri C.C., Cerri C.E.P., Siquerra Neto M., Metay A., Perrin A.-S., Scopel E., Razafimbelo T., Blavet D., Piccolo M., Pavei M. et Milne E., 2006.** Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, A review. Dans : *Agronomie for Sustainable Development*, 26, pp. 1-8.
- Bronic C.J. et Lal R., 2004.** Soil structure and management: a review. Dans : *Geoderma*, 124, pp. 3-22.
- Brown G.G., Benito N.P., Pasini A., Sautter K.D., Guimarães M. et Torres E., 2003.** No-tillage greatly increases earthworm population in Paraná state, Brazil. Dans : *Pedobiologia*, 47, pp. 764-771.
- Chenu C., Le Bissonnais Y. et Arrouays D., 2000.** Organic Matter Influence on Clay Wettability and Soil Aggregate Stability. Dans : *Soil Science Society of America Journal*, 64, pp.1479-1486.
- Cluzeau D., Cannavacciuolo M. et Pérès G., 1999.** Indicateurs microbiologiques des sols : les lombriciens – Méthode d'échantillonnage dans les agrosystèmes en zones tempérées. Dans : *12^e colloque viticole et œnologique : Cahier technique*, 1999, Ed. ITV Paris, pp. 25-35.
- Deen W. et Katak P.K., 2003.** Carbon sequestration in a long-term conventional versus conservation tillage experiment. Dans : *Soil & Tillage Research*, 74, pp.143-150.
- Dolan M.S., Clapp C.E., Allmaras R.R., Baker J.M. et Molina J.A.E., 2006.** Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management. Dans : *Soil & Tillage Research*, 89, pp. 221-231.
- Duiker S.W. et D.B. Beegle, 2005.** Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. Dans : *Soil and Tillage Research*, 88 (1-2), p. 30-41.
- Eynarda A., Schumachera T.E., Lindstromb M.J. et Maloa D.D., 2004.** Porosity and Pore-Size Distribution in Cultivated Ustolls and Usterts. Dans : *Soil Science Society of America Journal*, 68, pp.1927-1934
- Franzluebbers A.J., 2001a.** Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Dans : *Soil & Tillage Research*, 66, pp. 95-106.
- Franzluebbers A.J., 2001b.** Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. Dans : *Soil & Tillage Research*, 66, pp. 197-205.
- Guerif 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. La simplification du travail du sol. Dans : *Les Colloques n°65*, INRA, ITCF, CEMAGREF, Edition INRA, 1994, pp.13-33.
- Guéris F., Richard G., Dürr C., Machet J.M., Recous S. et Roger-Estrade J., 2001.** A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. Dans : *Soil & Tillage Research*, 61, pp.13-32.
- Jarecki M.K., Lal R. et James R., 2005.** Crop management effects on soil carbon sequestration on selected farmers' fields in north-eastern Ohio. Dans : *Soil & Tillage Research*, 81, pp. 265-276.
- Heddadj D., Gascuel-Odoux C., Cotinet P. et Hamon Y., 2005.** Mode de travail du sol, ruissellement et propriétés hydrodynamiques sur un dispositif expérimental de l'Ouest de la France. Dans : *Etude et Gestion des Sols*, 12, pp. 53-66.
- Holland J.M., 2004.** The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. Dans : *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113, pp.1-25.
- Jordan D., Miles R.J., Hubbard V.C. et Lorenz T., 2004.** Effect of management practices and cropping systems on earthworm abundance and microbial activity next term in Sanborn Field: a 115-year-old agricultural field. Dans : *Pedobiologia*, 48(2), pp. 99-110.
- Labreuche J., Cariolle M. et Quere L., 2004.** Techniques sans labour : bilan des expérimentations françaises. Techniques culturales sans labour, Impact économiques et environnementaux. Dans : *Colloque CORPEN* pp. 24-34.
- Le Bissonnais Y. et Le Souder C., 1995.** Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Dans : *Etude et Gestion des Sols*, 2, pp. 43-55.
- Lipiec J., Kuś J., Słowińska-Jurkiewicz A. et Nosalewicz A., 2005.** Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. Dans : *Soil and Tillage Research*, 89 (2), p. 210-220.
- Maillard A. et Cuendet G., 1997.** Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins : V. Propriétés biologiques du sol et vers de terre. Dans : *Revue Suisse Agricole*, 29(5), pp. 225-230.
- Maillard A., Neyroud J.-A. et Vez A., 1995.** Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins : III. Propriétés physiques du sol. Dans : *Revue Suisse Agricole*, 27(1), pp. 5-10.

- Nyakatawa E.Z., Reddy K.C. et Sistani K.R., 2001.** Tillage, cover cropping, and poultry litter effects on selected soil chemical properties. Dans : *Soil & Tillage Research*, 58, pp. 69-79.
- Osion K.R., Lang J.M. et Ebelhar S.A., 2005.** Soil organic carbon changes after 12 years of no-tillage and tillage of Grantsburg soils in southern Illinois. Dans : *Soil & Tillage Research*, 81, pp. 217-225.
- Pagliai M., Vignozzi N. et Pellegrini S., 2004.** Soil structure and the effect of management practices. Dans : *Soil & Tillage Research*, 79, pp.131-143.
- Peres G., 2003.** Identification et quantification *in situ* des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture breton. Thèse de l'Université de Rennes.
- Piovanelli C., Gamba C., Brandi G., Simoncini S. et Batistoni E., 2005.** Tillage choices affect biochemical properties in the soil profile. Dans : *Soil and Tillage Research*, 90 (1-2), p. 84-92.
- Rasmussen K.J., 1999.** Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. Dans : *Soil & Tillage Research*, 53, pp. 3-14.
- Reicosky, D.C., 2001.** Effect of Conservation Tillage on Soil Organic Carbon Dynamics: Field experiments in the US Corn Belt. Sustaining the global farm, pp. 481-485.
- Six J., Elliott E.T., Paustien K., 1999.** Aggregate and Soil Organic Matter Dynamics under Conventional and No-Tillage Systems. Dans : *Soil Science Society of America Journal*, 63, pp. 1350-1358.
- Smith P., 2004.** Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. Dans : *European Journal of Agronomy*, 20, pp. 229-236.
- Tebrügge F. et Düring R.-A., 1999.** Reducing tillage intensity – A review of results from a long-term study in Germany. Dans : *Soil & Tillage Research*, 53, pp.15-28.
- West T.O. et Post W.M., 2002.** Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation: A Global Data Analysis. Dans : *Soil Science Society of America Journal*, 66, pp.1930-1946.
- Whalen J.K. et Costa C., 2003.** Linking spatio-temporal dynamics of earthworm populations to nutrient cycling in temperate agricultural and forest ecosystems. Dans : *Pedobiologia*, 47, pp. 801-806.