



**HAL**  
open science

## Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen

R. Moussadek, R. Mrabet, Patrick Zante, Jean-Marie Lamachère, Yannick Pépin, Yves Le Bissonnais, L. M. Ye, A. Verdoort, E. van Ranst

### ► To cite this version:

R. Moussadek, R. Mrabet, Patrick Zante, Jean-Marie Lamachère, Yannick Pépin, et al.. Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91 (4), pp.627-635. 10.4141/cjss10096 . hal-02651122

**HAL Id: hal-02651122**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02651122>**

Submitted on 29 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen

Rachid Moussadek<sup>1,3</sup>, Rachid Mrabet<sup>1</sup>, Patrick Zante<sup>2</sup>, Jean Marie Lamachère<sup>2</sup>, Yannick Pépin<sup>2</sup>, Yves Le Bissonnais<sup>2</sup>, Liming Ye<sup>3</sup>, Ann Verdoodt<sup>3</sup>, et Eric Van Ranst<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut National de la Recherche Agronomique, BP 415, Avenue la Victoire, 10000, Rabat, Maroc (courriel: moussa.inra@gmail.com); <sup>2</sup>UMR LISAH, INRA – IRD - SupAgro, 2 Place Viala, 34060 Montpellier, Cedex 1, France; et <sup>3</sup>Laboratoire de Science du sol, Université de Gand, Krijgslaan 281/S8, B-9000 Gand, Belgique. Reçu le 8 septembre 2010; accepté le 17 février.

Moussadek, R., Mrabet, R., Zante, P., Lamachère, J. M., Pépin, Y., Le Bissonnais, Y., Ye, L., Verdoodt, A. et Van Ranst, E. 2011. **Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen.** Can. J. Soil Sci. **91**: 627–635. Les études d'érosion sur les Vertisols Méditerranéens sous semis direct sont rares. Cette étude traite de l'effet du travail du sol sur le ruissellement (LR) et les pertes en terre (Ero) en relation avec les propriétés du sol. Trois techniques culturales ont été étudiées sous simulation de pluie: semis avec travail conventionnel (SC), semis direct sans résidus de culture (SD0) et avec 50 % des résidus retournés à la parcelles et laissés en surface (SD50). Les résultats ont montré que la présence de résidus à la surface avait réduit le ruissellement et les pertes en sol de plus de 50% sous SD50 par rapport à SD0 et SC. Les sols sous SD50 et SD0 présentaient une structure plus stable (DMP), plus de matière organique (MO) et une densité apparente (Da) plus élevée que sous SC. Une régression multiple a montré que lorsque le sol était sec, la Da expliquait respectivement 84 et 96 % de la variation du ruissellement (LR) et des pertes de terre par érosion (Ero). Par contre, lorsque le sol était humide c'est le DMP qui expliquait respectivement 47 et 69 % de la variation de LR et Ero. En conclusion, certes sept années en SD a amélioré la qualité du sol (DMP, MO), par rapport au SC, mais le retour à la surface du sol d'environ 50 % des résidus de récolte s'est avéré nécessaire sous SD pour réduire significativement l'érosion hydrique.

**Mots clés:** Semis direct, mulch, érosion, simulation de pluie, Vertisol

Moussadek, R., Mrabet, R., Zante, P., Lamachère, J. M., Pépin, Y., Le Bissonnais, Y., Ye, L., Verdoodt, A. and Van Ranst, E. 2011. **Impact of tillage and residue management on the soil properties and water erosion of a Mediterranean Vertisol.** Can. J. Soil Sci. **91**: 627–635. Soil erosion research on Mediterranean Vertisols under no tillage systems (NT) is still scarce. A rainfall simulator was used on Vertisols to compare water runoff and soil loss in a conventional tillage system (CT), NT system with crop residues removed (NT0), and NT with 50% of crop residues returned to the soil surface (NT50). Runoff and soil loss rates were more than 50% lower under NT50 compared with NT0 and CT. Wet aggregate stability (MWD), soil organic matter (SOM) and soil bulk density (Da) were significantly higher under NT than under CT. A multiple regression analysis showed that when the soil was dry, Da explained 84 and 96% of the variation in water runoff and soil loss, respectively. Under wet soil conditions, MWD explained 47 and 69% of variation in water runoff and soil loss, respectively. Consequently, although NT systems improved soil quality (MWD, SOM) compared with the CT system, returning 50% of crop residues at the soil surface was mandatory under NT to protect these Vertisols against water erosion.

**Key words:** No-tillage system, crop residue, erosion, rainfall simulation, Vertisol

Au Maghreb et dans les régions méditerranéennes, l'érosion hydrique est un problème majeur en raison d'un couvert végétal réduit, de l'agressivité des pluies et de la fragilité des sols, ainsi ces facteurs contribuent largement à la dégradation des terres (Roose 1994; Lal et al. 1999). Cette dégradation dépend de la vulnérabilité du sol aux paramètres de l'érosion hydrique, notamment le ruissellement qui provoque le détachement du sol en particules solides transportées par l'écoulement superficiel (Roose 1994). Ce sont les sols labourés qui sont les plus exposés à l'érosion hydrique du fait de leur faible teneur en matière organique qui augmente la sensibilité

**Abréviations:** SC, semis avec travail conventionnel; SD0, semis direct sans mulch; SD50, semis direct avec 50 % du mulch; MO, matière organique; Da, densité apparente du sol; DMP, diamètre moyen pondéral; LR1, lame ruisselée durant 1<sup>ère</sup> pluie; LR2, lame ruisselée durant 2<sup>ème</sup> pluie; Ke1, coefficient d'écoulement durant 1<sup>ère</sup> pluie; Ke2, coefficient d'écoulement durant 2<sup>ème</sup> pluie; Linf1, lame infiltrée durant 1<sup>ère</sup> pluie; Linf2, lame infiltrée durant 2<sup>ème</sup> pluie; Conc1, concentrations en sédiment en eau ruisselé durant 1<sup>ère</sup> pluie; Conc2, concentrations en sédiment en eau ruisselé durant 2<sup>ème</sup> pluie; Ero1, perte en sol durant 1<sup>ère</sup> pluie; Ero2, perte en sol durant 2<sup>ème</sup> pluie.

des agrégats vis à vis de l'action des agents érosifs (Masciandaro et al. 1998; Gómez et al. 1999).

Dans le même sens, Lahlou et al. (2005) ont constaté que l'agriculture conventionnelle basée sur le labour intensif dégrade les propriétés physiques du sol et le rend plus sensible au processus de ruissellement. Devant cette situation alarmante, plusieurs chercheurs encouragent le remplacement du labour conventionnel par des pratiques agricoles de conservation tel que le semis direct (Alvaro-Fuentes et al. 2008). En effet, les avantages du semis direct sur l'amélioration du taux de la matière organique du sol ont été relevés dans plusieurs travaux de recherche (Lal 1989; Mrabet 2008). De plus, le semis direct contribue à l'amélioration de la stabilité structurale du sol (Duiker et Lal 1999; Saroa et Lal 2003), améliore sa porosité (Mulumba et Lal 2008) et augmente sa rétention en eau (Havlin et al. 1990; Duiker et Lal 1999). Quant à l'écoulement hydrique, Celiki (1987) et Mrabet (2002) ont observé que des sols méditerranéens labourés pouvaient présenter une infiltration inférieure à celle des sols sans labour.

Le maintien des résidus à la surface du sol sous semis direct assure une protection contre l'impact des gouttes de pluie et réduit ainsi l'érosion du sol (Rees et al. 2002; Findeling et al. 2003; Roose et al. 2008).

Cependant, les effets du semis direct sur certaines propriétés importantes du sol, notamment la densité apparente et le ruissellement, sont encore ambigus. En effet, plusieurs chercheurs ont observé une augmentation significative de la densité apparente du sol sous semis direct (Cassel et al. 1995; Bottenberg et al. 1999) ou encore une absence d'effet du semis direct sur la densité apparente du sol (Acosta et al. 1999; Duiker et Lal 1999). D'autres chercheurs ont montré que le ruissellement sous semis direct augmentait de 56 % par rapport au sol labouré en milieu semi-aride (Jones et al. 1994). Ceci montre l'intérêt d'étudier l'effet du semis direct sur les propriétés du sol et l'érosion hydrique en tenant compte des conditions locales (climat, type du sol et gestion de résidus).

Au Maroc, les recherches sur le semis direct ont commencé en 1983 dans les régions semi-arides (Bouzza 1990) et plusieurs études sur les effets de ce système de culture sur les rendements et sur la qualité du sol ont été réalisées. Cependant, aucune étude n'a eu lieu pour quantifier l'effet du semis direct (avec ou sans résidus) sur les propriétés du sol (densité apparente, matière organique, stabilité structurale) et son impact sur le ruissellement et les pertes en terres (Mrabet 2008). Pour pallier en partie à cette lacune sur les Vertisols du Plateau Central Marocain, les objectifs de ce travail sont: (1) d'étudier les effets de pluie simulée sur les paramètres de ruissellement et d'érosion d'une parcelle sous travail conventionnel, sous semis direct sans résidus de récolte ou avec 50 % des résidus de récolte retournés à la surface de la parcelle; (2) d'analyser les effets du semis direct et des résidus de récolte sur les propriétés du

sol; (3) d'identifier la relation entre les paramètres de l'érosion hydrique et les propriétés du sol.

## MATERIELS ET METHODES

### Description du Site

L'expérimentation est localisée dans la station expérimentale de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Merchouch (60 km au sud de Rabat; 33°37'N; 6°43'O). Les moyennes annuelles des précipitations et des températures sont de l'ordre de 400 mm pour les précipitations et de 23°C pour les températures. Les moyennes mensuelles interannuelles des précipitations et des températures sur une période de 40 ans (1969–2009) sont présentées dans la Figure 1. Cette expérimentation a été installée depuis 2004 dans le but d'observer l'effet à long terme du semis direct sur la qualité du sol et la production agricole. Elle a été réalisée sur une parcelle de 4 ha de pente faible (<5 %). Le sol est un Vertisol (Chernozem brun calcaire), riche en argile (>50 % d'argile), avec un pH basique et un drainage externe faible (Tableau 1).

L'essai est constitué de deux systèmes de travail du sol: un semis direct (SD) et un semis avec travail conventionnel (SC), pratiqués de 2004 à 2010 sur deux parcelles adjacentes de 200 m de longueur et de 100 m de largeur chacune. Le système conventionnel adopté est celui pratiqué par les agriculteurs de la région et qui

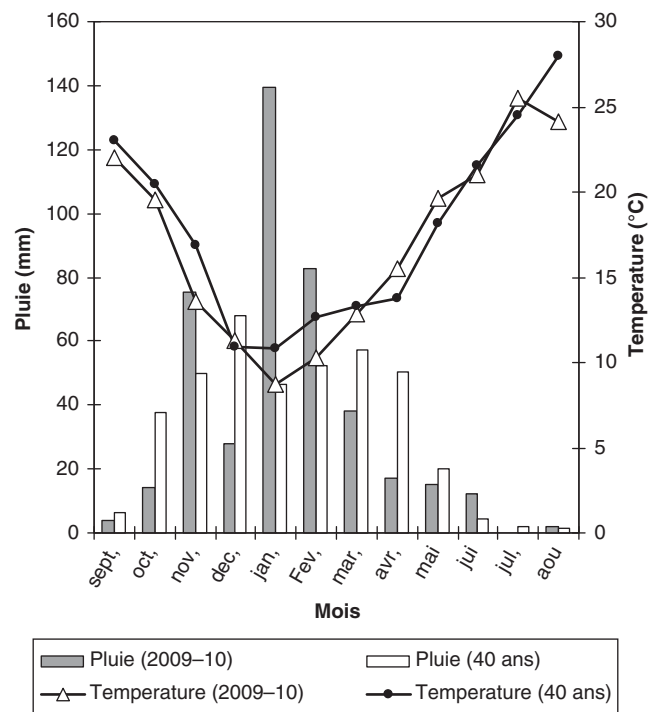


Fig. 1. Moyennes mensuelles interannuelles des précipitations et des températures à la station de Merchouch comparées aux valeurs mensuelles de l'année 2009–2010.

Tableau 1. Caractéristiques du sol à l'installation de l'expérimentation en 2004

| Profondeur (cm) | Argile (%) | Limon (%) | Sable (%) | pH (1:1 H <sub>2</sub> O) | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> ) | Na (cmol kg <sup>-1</sup> ) | K (cmol kg <sup>-1</sup> ) | Mg (cmol kg <sup>-1</sup> ) | Ca (cmol kg <sup>-1</sup> ) | CaCO <sub>3</sub> total (%) | Carbone organique (g kg <sup>-1</sup> ) | Azote totale (g kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|------------|-----------|-----------|---------------------------|--|---|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|------------------------------------|
| 0–20            | 50,0       | 37,3      | 12,7      | 7,83                      | 19,61  | 323                                     | 0,5                         | 0,2                        | 3,7                         | 14,1                        | 4,2                         | 12,2                                    | 1,18                               |
| 20–40           | 51,3       | 38,2      | 10,5      | 8,26                      | 4,24   | 184                                     | 0,3                         | 0,3                        | 3,1                         | 18,2                        | 9,6                         | 11,4                                    | 1,07                               |
| 40–90           | 52,5       | 35,1      | 12,4      | 8,60                      | 0,53   | 145                                     | 0,4                         | 0,5                        | 2,4                         | 23,1                        | 17,5                        | 9,7                                     | 0,89                               |

consiste au retournement profond (30 cm) du sol durant l'été avec un « stubble plow », suivi par un passage au chisel (15 cm) et de deux passages par une herse à disques (5 cm) pour préparer le lit de semence. Sous semis direct, il n'y a aucune opération de travail ou de préparation du sol. En effet, le semoir utilisé place les semences et les fertilisants sans aucun retournement du sol. Par souci d'homogénéisation, les deux parcelles ont été laissées en jachère les deux années précédant la mise en place de l'essai. Depuis septembre 2004, les parcelles reçoivent le même itinéraire technique (rotation, variété, dose de semis, dose et type engrais). En effet, la rotation adoptée est le blé tendre-lentille. Pour la culture du blé (d'hiver), les parcelles reçoivent la même dose de se  $\geq$  mis (0,14 t ha<sup>-1</sup>), la même dose d'engrais (0,15 t ha<sup>-1</sup>) de type complexe (14–28–14 c.à.d. 14 % d'azote, 28 % de phosphore et 14 % de potassium). Quant à la lentille, la dose de semis est de 0,04 t ha<sup>-1</sup> et la dose d'engrais est de 0,10 t ha<sup>-1</sup> de type complexe (14–28–14).

Pour étudier l'effet de la gestion des résidus sur les propriétés du sol sous semis direct, la parcelle sous SD a été subdivisée en deux sous parcelles de 1 ha en juin 2007. Dans la première sous parcelle, à la récolte on avait enlevé l'ensemble des résidus (SD0) alors que dans la deuxième la moitié des résidus a été retourné à la parcelle (SD50). En effet, On connaissait la quantité totale des résidus prélevés dans la première sous parcelle et la moissonneuse a été réglée pour ne récolter que 50 % des résidus dans la deuxième sous parcelle. En juin 2010, une campagne de simulation de pluie a été organisée sur les trois sous parcelles après la récolte du blé (hiver). Neuf micro-parcelles de 1 m<sup>2</sup> chacune ont été mises en place aléatoirement comme suit: trois micro-parcelles sous SC, trois sous SD0 et trois sous SD50.

## Les Mesures de Sol Effectuées

### Mesures de la Stabilité Structurale

Avant le démarrage de la simulation de pluie, trois échantillons de sol ont été prélevés à la surface (0–5 cm) dans les trois traitements (SC, SD0 et SD50) afin d'étudier la stabilité des agrégats selon la procédure proposée par Le Bissonnais (1996). Les échantillons ont été tamisés à sec pour obtenir des agrégats de 2 à 5 mm qui ont été ensuite séchés à l'étuve à 40°C pendant 48 heures. Ces agrégats ont subi trois tests de stabilité: (i) un traitement d'humectation rapide par immersion simulant la désagrégation du sol sous pluie intense après

une période sèche; environ 5 g d'agrégats ont été mis dans un bœcher et immergés dans l'eau distillée pendant 10 minutes; (ii) un traitement d'humectation lente par capillarité imitant le comportement du sol sous pluie modérée en période humide; environ 5 g d'agrégats ont été humectés par capillarité (à l'aide d'un papier filtre) avec de l'eau distillée pendant 60 minutes; (iii) un traitement de désagrégation mécanique par agitation après ré-humectation permettant de tester la cohésion du sol à l'état humide indépendamment de l'éclatement; environ 5 g d'agrégats ont été immergés dans l'éthanol pendant 30 minutes, puis transférés dans un flacon d'eau distillée; l'ensemble a été soumis à 20 retournements sur un agitateur rotatif et laissé à décanter pendant 10 minutes.

Après chacun des trois traitements décrits ci-haut les agrégats ont été transférés et tamisés à 50 µm dans l'éthanol: après 5 cycles d'immersion et d'émersion, les agrégats restants (>50 µm) ont été transférés dans un bœcher à l'aide d'une pissette d'éthanol pour être séchés à l'étuve ventilée (40°C) pendant 48 heures. La détermination de la distribution des différentes classes d'agrégats a ensuite été réalisée sur les agrégats séchés par un tamisage à sec sur une colonne de 6 tamis de maille décroissante; après 20 basculements latéraux de cette colonne, apparaissent 7 classes d'agrégats de diamètre : >2 mm, compris entre 1 et 2 mm, 0,5 et 1 mm, 0,2 et 0,5 mm, 0,1 et 0,2 mm, 0,05 et 0,1 mm et <0,05 mm. Le DMP des trois traitements (eau, éthanol et ré-humectation) a été calculé comme la somme de la fraction de masse restant sur chaque tamis après le tamisage, multipliée par la maille moyenne des tamis adjacents. Le DMP du sol pour chaque traitement est défini par Le Bissonnais (1996) comme suit:

$$\text{DMP} = \left( \sum (\text{diaméral moyen entre 2 tamis} \times [\% \text{ pondéral des particules retenues sur le tamis}]) \right) / 100$$

Ce qui devient, pour les tamis utilisés:

$$\begin{aligned} \text{DMP} = & ((3.5 \times [\% > 2 \text{ mm}]) + (1.5 \times [\% 1 \text{ à } 2 \text{ mm}]) \\ & + (0.75 \times [\% 0.5 \text{ à } 1 \text{ mm}]) \\ & + (0.35 \times [\% 0.2 \text{ à } 0.5 \text{ mm}]) \\ & + (0.15 \times [\% 0.1 \text{ à } 0.2 \text{ mm}]) \\ & + (0.075 \times [\% 0.05 \text{ à } 0.1 \text{ mm}]) \\ & + (0.025 \times [\% < 0.05 \text{ mm}])) / 100 \end{aligned}$$

Plus le DMP d'un sol est élevé, plus sa stabilité structurale est grande.

### Densité Apparente

La mesure de la densité apparente ( $D_a$ ) a été réalisée selon la procédure décrite par Grossman et Reinsch (2002). Juste avant le démarrage des tests de simulation de pluie, on a prélevé dans chacun des trois traitements (SC, SD0 et SD50) des cylindres non remaniés à deux profondeurs (0–15 et 15–30 cm) et avec trois répétitions. Ces cylindres ont été pesés et laissés à l'étuve (105°C) pendant 24 h et repesés pour obtenir le pourcentage du poids de l'eau par rapport au poids du sol sec. Ce dernier est ramené au volume du cylindre pour avoir la densité apparente de l'échantillon.

### Matière Organique

De la même manière et avant le démarrage des tests de simulation de pluie, trois échantillons du sol dans chaque traitement ont été prélevés à la surface (0–7 cm). La matière organique a été dosée à l'aide du micro-analyseur thermo Finnigan NA 2000. Les résultats de la matière organique du sol ont été exprimés en % ( $\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$  du sol tamisé à 2 mm).

### Simulation de Pluie

Dans chaque traitement (SC, SD0 et SD50), trois micro-parcelles ont subi les tests de simulation de pluie grâce à un mini simulateur de pluies analogue à celui d'Asseline et Valentin (1978) équipé d'un système automatique de régulation de l'intensité de pluie et commandé par un ordinateur portable. Pour chacune de ces micro-parcelles, deux séquences de pluies ont été simulées: une première pluie de  $36 \text{ mm h}^{-1}$  pendant 60 minutes, suivie d'une pluie de  $60 \text{ mm h}^{-1}$  pendant 30 minutes. Ces intensités de pluies ont été choisies sur la base des observations locales de la station climatique de Merchouch. Durant chaque pluie, le ruissellement a été mesuré et l'eau de ruissellement a été prélevée à des intervalles de temps réguliers grâce à un système de gouttières installé au niveau des micro-parcelles afin de déterminer les charges solides associées aux débits ruisselés.

L'humidité pondérale (masse d'eau perdue par kg de sol après séchage à 105°C pendant 24 h) initiale de la surface du sol a été mesurée au début de chaque simulation de pluie. Trois échantillons du sol ont été prélevés à (0–10 cm) de profondeur et en bordure de chaque micro-parcelle dans la zone soumise à la pluie simulée.

D'autres paramètres ont été mesurés et calculés lors de la simulation de pluie, notamment:

- les lames ruisselées (en mm) durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> pluie ( $LR_1$  et  $LR_2$ ),
- les lames infiltrées (en mm) à la fin de la 1<sup>ère</sup> et de la 2<sup>ème</sup> pluie ( $Linf_1$  et  $Linf_2$ ) calculées comme suit : ( $Linf_i = \text{Pluie}_i - LR_i$ ; pour la pluie  $i$ ),

- les coefficients d'écoulement (en%) durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> pluie ( $Ke_1$  et  $Ke_2$ ) avec : ( $Ke_i = (LR_i / \text{pluie}_i) \times 100$ ; pour la pluie  $i$ );
- les concentrations en sédiments de l'eau de ruissellement (en  $\text{g L}^{-1}$ ) durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> pluie ( $Conc_1$  et  $Conc_2$ );
- les taux de perte en sol (en  $\text{g m}^{-2}$ ) durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> pluie ( $Ero_1$  et  $Ero_2$ ) avec ( $Ero_i = Conc_i \times LR_i$ ; pour la pluie  $i$ ).

### Analyse Statistique des Données

L'effet des trois traitements (SC, SD0 et SD50) sur les propriétés du sol a été testé par l'utilisation de la méthode statistique de la variance (ANOVA) avec le test du Tukey pour la comparaison des moyennes. La régression multiple (type stepwise) a été utilisée pour mettre en avant l'existence des relations entre les différents paramètres du sol et les coefficients de l'érosion hydrique. Le logiciel utilisé pour les traitements statistiques est SPSS version 17.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Ruissellement et Pertes en Terre

La Figure 2 montre que durant la première pluie ( $36 \text{ mm h}^{-1}$  pendant 1 heure), sur un sol de faible humidité pondérale en surface (< 10 %), la lame écoulée reste faible pour l'ensemble des traitements (inférieure à 5 mm). Par contre le ruissellement est devenu plus important sur les micro-parcelles sous SD0 et a atteint, après 40 minutes de pluie, un débit ruisselé de l'ordre de  $27 \text{ mm h}^{-1}$  pour une intensité de pluie de  $36 \text{ mm h}^{-1}$ , indiquant que 75 % de la pluie se transformait en ruissellement ( $Ke_1$ ). Au cours de la seconde pluie ( $60 \text{ mm h}^{-1}$  pendant 30 minutes), le coefficient d'écoulement  $Ke_2$  a atteint 68 % pour SD0, 56 % pour SC contre seulement 21% pour SD50 (Tableau 2). Si on compare les débits ruisselés à l'intensité de la pluie, le rapport est presque identique (0,88) pour SC et SD0 mais il reste nettement plus faible (0,70) pour SD50. Quant aux vitesses d'infiltration qui correspondent à ces débits ruisselés stabilisés, elles sont égales à  $6,8 \text{ mm h}^{-1}$  pour SD0,  $7,0 \text{ mm h}^{-1}$  pour SC et  $18,0 \text{ mm h}^{-1}$  pour SD50.

Le Tableau 2 montre que le semis direct avec résidus se distingue nettement des autres traitements avec une lame infiltrée significativement plus élevée ( $Linf_2 = 23,7 \text{ mm}$ , contre  $13,2 \text{ mm}$  et  $9,7 \text{ mm}$  pour respectivement SC et SD0). Plusieurs auteurs ont obtenu des résultats similaires. En effet, Lang et Mallet (1984) ont trouvé que l'infiltration augmentait de 54 % lorsque 45 % des résidus étaient laissés au sol. Ruan et al. (2001) ont montré que l'infiltration augmentait de manière curvilinearé avec la quantité de résidus laissés au sol. Par ailleurs, la concentration des sédiments durant la seconde pluie s'est avérée aussi significativement plus élevée sous SC et SD0 ( $2,8 \text{ g L}^{-1}$  et  $2,4 \text{ g L}^{-1}$ , respectivement) par rapport au SD50 ( $1,45 \text{ g L}^{-1}$ ). Les taux d'érosion mesurés ont été minimum sous SD50

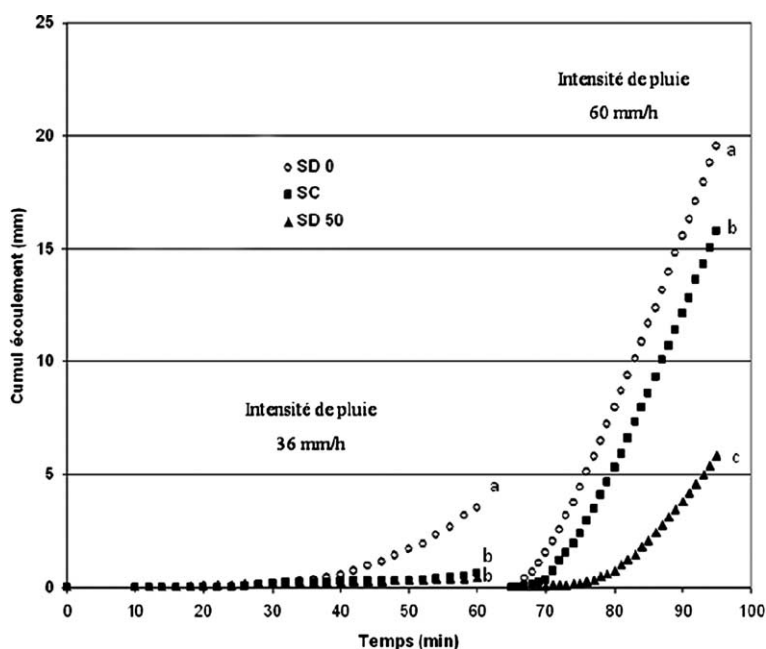


Fig. 2. Effet de deux intensités de pluie sur le ruissellement cumulé sous semis avec travail conventionnel (SC), semis direct sans résidus de culture (SD0) et sous semis direct avec 50% des résidus retournés à la surface du sol (SD50). Pour chaque intensité de pluie, les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents selon le test de Tukey ( $P < 0,05$ ).

( $Ero_2 = 8,8 \text{ g m}^{-2}$ ) et nettement plus élevés sous SD et SC ( $Ero_2 = 49,9 \text{ g m}^{-2}$  et  $47,9 \text{ g m}^{-2}$ , respectivement). Ceci indique que la présence des résidus en surface du sol est indispensable pour réduire les pertes en terres sur les Vertisols en SD. Ceci concorde avec les travaux de Bradford et Huang (1994) qui ont rapporté que le mode de travail du sol (SD ou SC) intervient peu dans le contrôle des pertes en terres et que les résidus laissés à la

surface du sol réduisent l'impact mécanique des gouttes de pluie ce qui diminue les pertes en terres. Cependant, Doran (1980) a montré que le semis direct comme mode de travail du sol est indispensable pour réduire l'érosion du sol et que l'activité biologique augmente en présence des résidus à la surface dans les sols non labourés ce qui améliore leurs propriétés physiques et les rendent plus résistants aux agents de l'érosion hydrique.

Tableau 2. Paramètres de ruissellement et d'érosion mesurés lors de la simulation de pluie selon le mode du travail du sol

| Coefficients <sup>y</sup>   | Traitements <sup>z</sup>   |                 |                |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------|----------------|
|                             | SC                         | SD0             | SD50           |
| LR1 (mm)                    | 0,77 (0,61) a <sup>x</sup> | 3,92 (1,17) b   | 0,43 (0,11) a  |
| LR2 (mm)                    | 16,82 (2,90) b             | 20,37 (1,34) c  | 6,29 (2,81) a  |
| Ke1 (%)                     | 2,12 (0,11) a              | 11,14 (0,32) b  | 1,23 (0,19) a  |
| Ke2 (%)                     | 56,00 (10,00) b            | 68,00 (4,05) c  | 20,90 (9,38) a |
| Linfl1 (mm)                 | 35,23 (0,61) b             | 32,08 (1,17) a  | 35,57 (0,11) b |
| Linfl2 (mm)                 | 13,19 (2,90) b             | 9,63 (1,34) a   | 23,71 (2,81) c |
| Conc1 ( $\text{g L}^{-1}$ ) | 1,56 (1,56) b              | 1,56 (1,58) b   | 0,63 (0,94) a  |
| Conc2 ( $\text{g L}^{-1}$ ) | 2,85 (2,42) b              | 2,45 (1,85) b   | 1,41 (0,96) a  |
| Ero1 ( $\text{g m}^{-2}$ )  | 1,20 (0,96) b              | 6,12 (1,85) c   | 0,27 (0,47) a  |
| Ero2 ( $\text{g m}^{-2}$ )  | 47,95 (7,01) b             | 49,98 (10,93) b | 8,84 (4,09) a  |

<sup>a</sup>SC, semis avec travail conventionnel; SD0, semis direct sans résidus de culture; SD50, semis direct avec 50% des résidus retournés à la surface de la parcelle.

<sup>y</sup>LR1, lame ruisselée durant 1<sup>ère</sup> pluie; LR2, lame ruisselée durant 2<sup>ème</sup> pluie; Ke1, coefficient d'écoulement durant 1<sup>ère</sup> pluie; Ke2, coefficient d'écoulement durant 2<sup>ème</sup> pluie; Linfl1, lame infiltrée durant 1<sup>ère</sup> pluie; Linfl2, lame infiltrée durant 2<sup>ème</sup> pluie; Conc1, concentrations en sédiment en eau ruisselé durant 1<sup>ère</sup> pluie; Conc2, concentrations en sédiment en eau ruisselé durant 2<sup>ème</sup> pluie; Ero1, perte en sol durant 1<sup>ère</sup> pluie; Ero2, perte en sol durant 2<sup>ème</sup> pluie.

<sup>z</sup>Les valeurs entre parenthèses est l'écart type par rapport à la valeur moyenne présentée ( $n = 3$ ). Dans la même ligne, les valeurs ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement selon le test de Tukey ( $P < 0,05$ ).

## Diamètre Moyen Pondéré, Matière Organique et Densité Apparente

### Le Diamètre Moyen Pondéré

Les résultats des tests de la stabilité structurale (Figure 3) montrent qu'il n'y a pas eu de différence significative entre les trois pratiques culturales pour le test d'humectation rapide avec des valeurs de DMP faibles pour les trois traitements (<0,8 mm). Ce résultat démontre qu'après 7 années sous SD (avec ou sans résidus), le sol ne peut toujours pas résister mieux à l'éclatement suite à une réhumectation rapide. Il semble qu'il faut plus de temps dans les conditions semi-aride du Maroc pour que le Vertisol sous SD accumule suffisamment de MO afin qu'il puisse résister à l'éclatement des agrégats sous ce test.

Pour le test de ré-humectation lente, le sol sous semis direct avec paillage (SD50) présente une valeur de DMP égale à 1,41 mm, significativement plus élevée que pour les deux autres pratiques (1,01 mm pour SD0 et 0,75 mm pour SC). Ceci montre que, sous semis direct, la présence des résidus améliore la résistance du sol lors d'une humectation lente qui simule l'effet des pluies modérées. De même, pour le test avec l'éthanol, la stabilité des agrégats était supérieure sous SD50 que sous SD0 et SC. Le DMP moyen obtenu pour les trois tests de stabilité a été significativement plus élevé sous SD (avec ou sans résidus) que sous SC. Ainsi on peut conclure que les parcelles sous SC ont une stabilité structurale faible (DMP <0,8 mm) alors que les parcelles sous SD (avec ou sans résidus) ont une

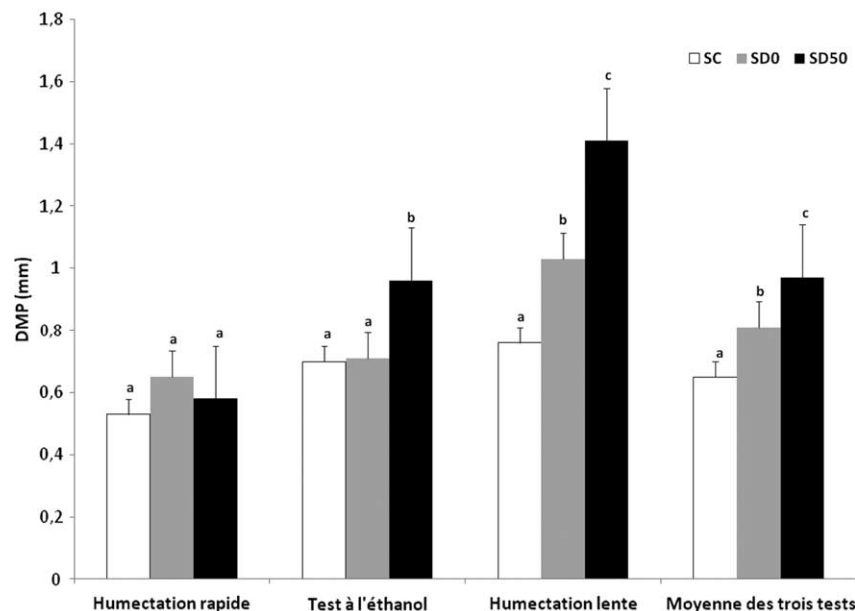
structure plus stable selon les normes élaborées par Le Bissonnais (1996). Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Mrabet et al. (2001) qui ont rapporté que le semis direct améliore la stabilité structurale du sol.

### La Matière Organique

Les résultats du Tableau 3 montrent que les parcelles sous semis direct avec résidus (SD50) ont une teneur plus élevée en matière organique (MO) que les autres pratiques culturales. Ces résultats rejoignent ceux de Mrabet et al. (2001) qui ont trouvé que la teneur en matière organique a augmenté de 13% dans une profondeur du sol inférieure à 7 cm sous SD avec du mulch par rapport au SC dans un climat semi-aride similaire à celui de la région d'étude. Ce résultat est surprenant vu le temps relativement court de l'expérimentation mais certains auteurs expliquent ces résultats par les conditions climatiques semi aride du milieu qui accélèrent la décomposition des résidus et favorisent l'accumulation de la matière organique en surface du sol sous SD (Paustian et al. 2000).

### La Densité Apparente

Selon le Tableau 3, la Da était élevée sous les trois traitements (>1,4 g cm<sup>-3</sup>). Ce résultat est conforme aux Da observées par Murthy et al. (1982) sur des Vertisols et qui peuvent atteindre 2 g cm<sup>-3</sup>. Ainsi, la Da de la surface du sol (0-15 cm), mesurée avant la première pluie (sol sec), était plus élevée en semis direct sans résidus (1,67 g cm<sup>-3</sup>) que celle obtenue en semis



**Fig. 3.** Effet des modes du travail du sol (semis avec travail conventionnel (SC), semis direct sans résidus de culture (SD0) et sous semis direct avec 50% des résidus retournés à la surface du sol (SD50)) sur le diamètre moyen pondéral (DMP). Pour les trois types de mesure du DMP (humectation rapide, test à l'éthanol, humectation lente) et pour la moyenne de ces trois tests, les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents selon le test de Tukey ( $P < 0,05$ ).

Tableau 3. Effet des trois pratiques culturales sur les propriétés du sol

| Propriétés du sol <sup>y</sup>      | Traitements <sup>z</sup>   |               |               |
|-------------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|
|                                     | SC                         | SD0           | SD50          |
| MO (%) (0–7 cm)                     | 1,47 (0,31) a <sup>x</sup> | 1,79 (0,19) b | 2,05 (0,27) c |
| Da (g cm <sup>-3</sup> ) (0–15 cm)  | 1,45 (0,58) a              | 1,67 (0,42) c | 1,51 (0,34) b |
| Da (g cm <sup>-3</sup> ) (15–30 cm) | 1,48 (0,43) a              | 1,69 (0,35) b | 1,54 (±,24) b |

<sup>z</sup>SC, semis avec travail conventionnel; SD0, semis direct sans résidus de culture; SD50, semis direct avec 50% des résidus retournés à la surface de la parcelle.

<sup>y</sup>MO, taux de la matière organique; Da, densité apparente du sol.

<sup>x</sup>Les valeurs entre parenthèses sont l'écart type par rapport à la valeur moyenne présentée ( $n=3$ ). Dans la même ligne, les valeurs suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement selon le test de Tukey ( $P < 0,05$ ).

direct paillé (1,51 g cm<sup>-3</sup>) et en semis avec travail conventionnel (1,45 g cm<sup>-3</sup>). Ceci concorde avec les travaux de plusieurs auteurs (Bruce et al. 1990; Cassel et al. 1995) qui ont montré que sous SD, la densité apparente est plus élevée sur 75 cm du profil du sol par rapport au SC. Ceci amène à conclure que le semis direct augmente la compaction des sols argileux mais plusieurs auteurs estiment que cette compaction sous SD diminue avec le temps suite à l'intensification de l'activité biologique sous SD (Dress et al. 1994; Jordan et al. 2010). Il est à noter que malgré sa densité apparente élevée, le sol sous SD50 a présenté un taux d'infiltration plus important que sous SC et SD0 (voir Tableau 2). Ceci peut être expliqué, selon la Figure 3, par la présence d'une structure stable sous SD50 par rapport aux autres traitements (SD0 et SC). Il est aussi probable que la présence des résidus sous SD50 a favorisé l'infiltration en freinant le déplacement de l'eau à la surface du sol et réduisant ainsi le ruissellement.

### Relation Entre les Propriétés Physiques et les Coefficients de Ruissellement

Pour expliquer les différences de ruissellement et de pertes en terre observées entre les trois pratiques

culturales testées dans nos expériences, nous avons recherché l'existence éventuelle de relations entre les variables du ruissellement et de pertes en terre et les variables pédologiques qui pourraient a priori les influencer: DMP, Da et MO (Roose 1994). Le Tableau 4 montre les résultats de régressions multiples entre le ruissellement (LR) et pertes en terres (Ero) comme paramètres dépendants des trois propriétés mesurées du sol (DMP, Da et MO). Les résultats suggèrent que les propriétés du sol qui interviennent dans le déclenchement du ruissellement sont différentes selon l'état hydrique du sol. En effet, quand le sol était sec (avant la première pluie de simulation) et selon les équations de régression rapportées dans le Tableau 4 (Eq. 2 et Eq. 7), la Da a pu à elle seule expliquer 84% de la variation de la lame ruisselée (LR1) et 96% de la variation des sédiments détachés du sol (Ero1). Cependant, quand le sol était humide (après une pluie de 36 mm h<sup>-1</sup> pendant 60 min) et selon les équations 5 et 10, c'est la stabilité structurale (DMP) qui est intervenu pour 47% de la variation de la lame ruisselée (LR2) et pour 69% de celle de l'érosion (Ero2). Ces résultats sont en concordance avec les travaux de Le Bissonnais et al. (2007) qui ont trouvé des relations significatives entre l'érosion

Tableau 4. Relation entre les propriétés physiques du sol et les coefficients de ruissellement

| Propriétés de l'érosion <sup>z</sup> | Equation de régression en fonction des propriétés du sol <sup>y</sup> | Coefficients de régression <sup>x</sup> |                     |               |
|--------------------------------------|---|---|---------------------|---------------|
|                                      |   | R <sup>2</sup>                          | R <sup>2</sup> adj. | Err. St. Est. |
| LR1                                  | LR1 = 17,7 Da - 2,6 MO - 20,9 (Eq. 1)                                 | 0,98                                    | 0,97                | 0,27          |
|                                      | LR1 = 15,3 Da - 21,92 (Eq. 2)   | 0,84                                    | 0,81                | 0,7           |
| LR2                                  | LR2 = 13,7 DMP + 51,1 Da - 0,3 MO - 19,9 (Eq. 3)                      | 0,99                                    | 0,98                | 0,81          |
|                                      | LR2 = -38,4 DMP + 42,9 Da - 20,6 (Eq. 4)                              | 0,89                                    | 0,86                | 2,35          |
|                                      | LR2 = -32,5 DMP + 39,2 (Eq. 5)  | 0,47                                    | 0,4                 | 4,87          |
| Ero1                                 | Ero1 = 28,8 Da - 4,7 MO - 33,5 (Eq. 6)                                | 0,97                                    | 0,79                | 0,29          |
|                                      | Ero1 = 24,5 Da - 35,4 (Eq. 7)   | 0,96                                    | 0,95                | 0,14          |
| Ero2                                 | Ero2 = -36,9 DMP + 125,5 Da - 61 MO - 19,7 (Eq. 8)                    | 0,99                                    | 0,99                | 0,77          |
|                                      | Ero2 = -138,4 DMP + 109,7 Da - 20,8 (Eq. 9)                           | 0,96                                    | 0,95                | 4,4           |
|                                      | Ero2 = -118,4 DMP + 131,9 (Eq. 10)                                    | 0,69                                    | 0,65                | 11,8          |

<sup>z</sup>LR1, lame ruisselée durant 1<sup>ère</sup> pluie; LR2, lame ruisselée durant 2<sup>ème</sup> pluie; Ero1, perte en sol durant 1<sup>ère</sup> pluie; Ero2, perte en sol durant 2<sup>ème</sup> pluie.

<sup>y</sup>MO, taux de matière organique (en %); Da, densité apparente du sol (en g cm<sup>-3</sup>); DMP, diamètre moyen pondéral (en mm).

<sup>x</sup>R<sup>2</sup>, coefficient de détermination; R<sup>2</sup> adj., coefficient de détermination ajusté; Err. St.Est., erreur standard d'estimation.



et la stabilité structurale. Par ailleurs, les équations 4 et 9, montrent que les régressions intégrant les deux propriétés physiques (Da et DMP) sont capables de mieux prédire le ruissellement et les pertes en sédiment quand l'humidité antécédente est élevée. Quant à la MO, elle intervient dans l'amélioration de la qualité de la régression pour le ruissellement quand le sol est sec (Eq.1) mais elle a un moindre effet quand le sol est humide (Eq. 3 et Eq. 8). Il est possible que l'effet de la MO soit masqué par les autres propriétés du sol (DMP, Da). En effet, une analyse de la corrélation entre ces trois paramètres a montré que la MO était corrélée significativement ( $P < 0,05$ ) avec DMP ( $r^2 = 0,71$ ) mais non corrélée avec Da ( $r^2 = 0,32$ ). Ceci rejoint les travaux de Blanco-Conqui et Lal (2007) qui ont observé de forte corrélation entre MO et DMP. En effet, l'accumulation de la MO sous SD s'est traduite par l'augmentation du DMP et l'amélioration de la résistance des agrégats à une réhumectation lente (Figure 3) et une meilleure infiltration de l'eau. Ces avantages sont plus évidents sous SD50 car l'apport de résidus de culture sous SD a favorisé l'augmentation de MO par rapport à SD0 (Tableau 3) ce qui a amplifié d'autant le DMP et la stabilité des agrégats. Ceci, comme l'indique les résultats du Tableau 2, a engendré une diminution significative du ruissellement et une amélioration significative ( $P < 0,05$ ) des conditions d'infiltration. Ce qui semble être dû à un effet combiné d'un freinage de l'écoulement de l'eau en surface par les résidus et d'un meilleur développement d'une porosité inter-agrégats favorisant l'entrée de l'eau dans le sol.

Aussi, on peut conclure que l'état de l'humidité antécédente du sol est important pour prédire le comportement du sol vis-à-vis de l'écoulement liquide et solide. Lorsque le sol est sec, la densité apparente du sol, exprimant sa porosité et son degré de compaction, décrit mieux la vulnérabilité du sol à l'érosion hydrique. Par contre, quand le sol est plus humide, l'écoulement solide et liquide est plutôt lié au degré de stabilité des agrégats à la surface du sol qui est fonction de la teneur en MO. La qualité de la régression pourrait probablement être améliorée par l'augmentation du nombre d'observations terrain et par l'intégration d'autres propriétés comme la rugosité du sol.

### CONCLUSION

Cette étude a montré l'effet positif du semis direct sur la qualité du sol en augmentant son taux de matière organique et en stabilisant sa structure mais les résultats obtenus sous simulation de pluie mettent en avant l'importance du maintien des résidus dans ce système vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion. En effet, la présence en surface d'environ 50% des résidus sous SD a réduit significativement les risques de ruissellement et d'érosion pour les sols argileux de cet essai grâce à son rôle de protection contre la désagrégation du sol sous l'impact des gouttes de pluie et contre le détachement des particules par les eaux de ruissellement.

Cependant ces résultats ne sont obtenus qu'à partir d'une seule campagne de simulation de pluie et il serait donc nécessaire de prolonger cette étude par un suivi régulier et à long terme du dispositif expérimental avec d'autres simulations de pluie pour vérifier la durabilité de l'impact du semis direct, avec et sans résidus, sur les propriétés du sol (stabilité structurale, densité apparente et stock de matière organique) et les effets sur le ruissellement et les pertes en terre. Ceci permettra de bien identifier le mode de travail du sol le mieux adapté aux conditions locales du milieu.

- Acosta, M. V., Reicher, Z., Bischoff, M. et Turco, R. F. 1999.** The role of tree leaf mulch and nitrogen fertilizer on turfgrass soil quality. *Biol. Fertil. Soils* **29**: 55–61.
- Alvaro-Fuentes, J., Arrúe, J. L., Cantero-Martínez, C. et López, M. V. 2008.** Aggregate breakdown during tillage in a Mediterranean loamy soil. *Soil Tillage Res.* **101**: 62–68.
- Asseline, J. et Valentin, C. 1978.** Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cahiers ORSTOM série hydrologie* **15**: 321–349.
- Blanco-Conqui, H. et Lal, R. 2007.** Regional assessment of soil compaction and structural properties under no-tillage farming. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **71**: 1770–1778.
- Bottenberg, H., Masiunas, J. et Eastman, C. 1999.** Strip tillage reduces yield loss of snapbean planted in rye mulch. *Hortic. Technol.* **9**: 235–240.
- Bouza, A. 1990.** Water conservation in wheat rotations under several management and tillage systems in semiarid areas. Ph.D. thesis, University Nebraska, Lincoln, NE. 200 p.
- Bradford, J. M. et Huang, C. 1994.** Interill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil Tillage Res.* **31**: 353–361.
- Bruce, R. R., Langdale, G. W. et Dillard, A. L. 1990.** Tillage and crop rotation effect on characteristics of a sandy surface soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54**: 1744–1747.
- Cassel, D. K., Raczkwski, C. W. et Denton, H. P. 1995.** Tillage effect on corn production and soil physical conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **59**: 1436–1443.
- Celiki, I. 1987.** Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil Tillage Res.* **83**: 270–277.
- Doran, J. W. 1980.** Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**: 765–771.
- Dress, L. R., Karathansis, A. D., Wilding, L. P. et Belvins, R. L. 1994.** Micromorphological characteristics of long term no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **58**: 508–517.
- Duiker, S. W. et Lal, R. 1999.** Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in Central Ohio. *Soil Tillage Res.* **52**: 73–81.
- Findeling, A. Ruy, S. et Scopel, E. 2003.** Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *J. Hydrol.* **275**: 49–66.
- Gómez, J. A., Giráldez, J. V., Pastor, M. et Fereres, E. 1999.** Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil Tillage Res.* **52**: 167–175.
- Grossman, R. B. et Reinsch, T. G. 2002.** Bulk density and linear extensibility. Pages 201–228 *dans* J. H. Dane and G. C. Topp,

- éd. Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Havlin, J. L., Kissel, D. E., Maddus, L. D., Claassen, M. M. et Long, J. H. 1990.** Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54**: 448–452.
- Jones, O. R., Hauser, V. L. et Popham, T. W. 1994.** No-tillage effects on infiltration, runoff and water conservation on dry land. *Trans. ASAE.* **37**: 473–479.
- Jordan, A., Zavala, L. M. et Gil, J. 2010.** Effect of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena* **81**: 77–65.
- Lahlou, S., Ouadia, M., Malam Issa, O., Le Bissonnais, Y. et Mrabet, R. 2005.** Modification de la porosité du sol sous les techniques culturales de conservation en zone semi-aride Marocaine. *Etude et Gestion des Sols.* **12**: 69–76.
- Lal, R. 1989.** Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments. *Adv. Agron.* **42**: 85–197.
- Lal, R., Mokma, D. et Lowery, B. 1999.** Relation between soil quality and erosion. Pages 237–258 *dans* R. Lal, éd. Soil quality and soil erosion. CRC Press, New York, NY.
- Lang, P. M. et Mallet, J. B. 1984.** Effect of the amount of surface maize residue on infiltration and soil losses from a clay loam soil. *S. Afr. J. Plant Soil* **1**: 97–98.
- Le Bissonnais Y. 1996.** Aggregate stability and assessment of crustability and erodibility: 1. theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* **47**: 425–437.
- Le Bissonnais, Y., Blavet, D., De Noni, G., Laurent, J. Y., Asseline, J. et Chenu C. 2007.** Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables. *Eur. J. Soil Sci.* **58**: 188–195.
- Masciandro, G., Ceccantini, B. et Gallardo-Lancho, J. F. 1998.** Organic matter properties in cultivated versus set-aside arable soils. *Agric. Ecosys. Environ.* **67**: 267–274.
- Mrabet, R. 2002.** Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. *Soil Tillage Res.* **66**: 119–128.
- Mrabet, R. 2008.** No-tillage systems for sustainable dry land agriculture in Morocco. INRA Publication. Fanigraph Ed., Rabat, Maroc. 153 p.
- Mrabet, R., Ibn Namr, K., Bessam, F. et Saber, N. 2001.** Soil chemical quality changes organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotation and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Land Degrad. Dev.* **12**: 505–517.
- Mulumba, L. N. et Lal, R. 2008.** Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil Tillage Res.* **98**: 106–111.
- Murthy, R. S., Bhattacharjee, J. C., Landey, R. J. et Pofali, R. M. 1982.** Distribution, characteristics and classification of Vertisols. Pages 3–22 *dans* Vertisols and rice soils of the tropics. 12th International Congress of Soil Science, ew Delhi, India.
- Paustian, K., Elliott, E. T., Six, J. et Hunt, H. W. 2000.** Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* **48**: 147–163.
- Rees, H. W., Chow, T. L., Loro, P. J., Lovoie, J., Monteith, J. O. et Blaauw, A. 2002.** Hay mulching to reduce runoff and soil loss under intensive potato production in Northwestern New Brunswick, Canada. *Can. J. Soil Sci.* **82**: 249–258.
- Roose, E. 1994.** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédologique, FAO*, no. 70, Rome, Italy. 420 p.
- Roose, E., Blavet, D., Sabir, M., Ouagga, T., Cheggour, A., Simonneaux, V., Oliver R., Ferrer, H., Louri, J. et Chotte, J. L. 2008.** Influence de l'utilisation d'un sol brun vertique sur les stocks de carbone du sol, les risques de ruissellement et d'érosion et le devenir du carbone érodé (bassin de l'oued Rheraya, Haut-Atlas, Maroc). Pages 317–324 *dans* E. Roose and J. Albergel, éd. Efficacité de la GCES en milieux semi-arides. AUF, EAC et IRD éditeurs, Paris, France.
- Ruan, H., Ahuja, L. R., Green, T. R. et Benjamin, J. G. 2001.** Residue cover and surface sealing: Effects on infiltration. Numerical simulation for field application. *Soil Sci. Soc. A. J.* **65**: 853–861.
- Sarao, G. S. et Lal, R. 2003.** Soil restorative effects of mulching on aggregation and carbon sequestration in a Miamian soil in Central Ohio. *Land Degrad. Dev.* **14**: 481–493.