

Influence du travail du sol et des rotations de cultures sur la qualité d'un sol argileux gonflant en milieu semi-aride marocain

N. Saber₍₁₎* et R. Mrabet₍₂₎

(1) Faculté des Sciences, Département de Géologie, BP 20, El-Jadida, 24000 Maroc

(2) Institut National de la Recherche Agronomique, Centre Aridoculture, BP 589 Settat 26000 Maroc

RÉSUMÉ

La ressource en eau demeure le facteur limitant la production céréalière en zones semi-arides marocaines. La conservation de l'eau comme son utilisation efficiente sont les éléments clé de l'agriculture pluviale. Les expérimentations à long-terme réalisées aux stations de recherche de l'Institut National de la Recherche Agronomique, pour dégager les systèmes de production à la fois productifs et durables, ont permis de conclure que le système du semis direct améliore les rendements, surtout en saisons sèches. Ces améliorations sont encore plus appréciables dans les rotations incluant une jachère. Ces performances notables dans la productivité sont associées à la qualité du sol. Ceci appelle une connaissance qualitative et quantitative approfondie des facteurs susceptibles d'introduire cette amélioration. Ces expérimentations, uniques à l'échelle nationale, ont fait l'objet de plusieurs mesures et observations particulièrement de l'agrégation, la matière organique, la matière organique particulaire, l'azote total et le pH. Les résultats les plus significatifs indiquent une meilleure agrégation hydrostable, une séquestration du carbone, une conservation de l'azote, une baisse du pH, et une importante teneur en matière organique particulaire en surface du sol sous semis direct en comparaison avec les surfaces travaillées. La rotation triennale incluant la jachère tend à présenter des indices de qualité du sol meilleurs que la rotation biennale blé-jachère ou blé sur blé. L'accumulation de la matière organique sous le semis direct sans labour ne se traduit pas par un appauvrissement de celle-ci en profondeur. La jachère contrôlée chimiquement a donc permis une amélioration du stockage de l'eau et l'élimination du labour a favorisé une qualité meilleure du sol.

Mots clés

Qualité du sol, non labour, matière organique, stabilité structurale

SUMMARY

INFLUENCE OF TILLAGE AND CROPPING SYSTEMS ON QUALITY OF A SWELLING CLAY SOIL OF SEMIARID MOROCCO

In a droughty country like Morocco, wheat production is constrained by limited water and soil resources. Water conservation and use are major objectives of any technological development project. Long-term experiments have shown the importance of no-tillage technology

enhancing and stabilizing production vis-a-vis climate constraints. These improvements in crops are also due to simultaneous changes in soil quality attributes under no-tillage. Therefore, soil quality indices as they vary with tillage and cropping system were gathered from long-term established experiments at Institut National de la Recherche Agronomique Research station (Sidi El Aydi, Morocco). This paper discusses changes in selected soil properties under contrasting tillage and crop rotations, including total and particulate soil organic matter, pH, total N and aggregation. Higher aggregation, carbon sequestration, pH decline and particulate organic matter build up are major and drastic changes associated with shift from conventional tillage to no-tillage system. Wheat fallow system resulted in reduction of organic matter compared to continuous wheat content, but 3-yr rotation including fallow tend to improve soil quality. Another important finding is the stratification of soil organic matter (in term of carbon, nitrogen and quality) in No-till surface layers without depletion at deeper layers compared to treatments receiving tillage. Consequently the increased yield associated with No-till system can be explained by both better water conservation and use and soil quality improvement.

Key-words

No-tillage, soil quality, soil organic matter, structural stability

RESUMEN**INFLUENZA DEL TRABAJO DE SUELO Y DE LAS ROTACIONES DE CULTIVOS SOBRE LA CALIDAD DE UN SUELO ARCILLOSO EXPANDIBLE EN MEDIO SEMIÁRIDO MARROQUÍ**

El recurso en agua queda el factor que limita la producción cerealera en zonas semiáridas marroquíes. La conservación del agua como su uso eficiente son elementos claves de la agricultura temporal. Las experimentaciones de largo tiempo realizadas en las estaciones de investigación del Instituto Nacional de la Investigación Agronómica, para identificar los sistemas de producción a la vez productivos y sostenibles, permitieron concluir que el sistema de siembra directa mejora los rendimientos, sobre todo durante las estaciones secas. Estas mejoras son aún mas apreciables en las rotaciones que incluyen un barbecho. Estas pruebas notables en la productividad son asociadas a la calidad del suelo. Esto llama un conocimiento cualitativo y cuantitativo profundizado de los factores susceptibles de introducir esta mejora. Estas experimentaciones, únicas a escala nacional, hicieron el objeto de varias medidas y observaciones como el agregación, la materia orgánica, la materia orgánica particular, el nitrógeno total y el pH. Los resultados mas significativos indican una mayor agregación hidroestable, una secuestación del carbono, una conservación del nitrógeno, una disminución del pH y un importante contenido en materia orgánica particular en superficie del suelo bajo siembra directa en comparación con las superficies trabajadas. La rotación trianual que incluye el barbecho tiende presentar índices de calidad del suelo mayores que la rotación bianual trigo-barbecho o trigo sobre trigo. La acumulación de la materia orgánica bajo siembra directa sin labranza no se traduce por un empobrecimiento de ella en profundidad. Entonces el barbecho controlado permitió una mejora del almacenamiento del agua y la eliminación de la labranza favoreció una calidad mayor del suelo.

Palabras claves

Nitrógeno mineral residual y su evolución durante el verano en función del precedente cultural en clima mediterráneo.

Dans les zones semi-arides, on assiste à une dégradation continue des ressources naturelles due à l'utilisation abusive et inadéquate des techniques agricoles. Ainsi, le labour intensif entraîne une détérioration de la qualité du sol ce qui menace la production agricole à long-terme, dans tout le bassin méditerranéen (Lopez Bellido, 1992). Les travaux récents montrent d'une façon irréfutable que la stabilisation et l'amélioration des rendements céréaliers dans les zones semi-arides marocaines ne peuvent se réaliser à long-terme qu'à travers le remplacement du système conventionnel (LC) du travail du sol par le non labour ou semis direct (NL) (Bouzza, 1990; Kacemi, 1992; Mrabet, 1997; Mrabet, 2000). Ces mêmes auteurs attribuent les performances réalisées au niveau des rendements de blé sous le NL à la capacité du sol à stocker plus d'eau sous ce système (Kacemi *et al.*, 1995). Ces résultats peuvent aussi indiquer des changements positifs dans la qualité du sol sous le non labour en comparaison avec le labour conventionnel. Ces changements sont attribués aux résidus de récolte maintenus à la surface du sol qui jouent un rôle très important dans la protection du sol contre l'érosion et dans l'approvisionnement du sol en éléments nutritifs par séquestration de la matière organique (Doran, 1980; Harvin *et al.*, 1990; Wood *et al.*, 1991; Karlen *et al.*, 1994; Mrabet et Bouzza, 2000).

Mc Garry *et al.* (2000) ont montré que le NL est particulièrement adapté aux sols argileux gonflants australiens puisqu'il aide à minimiser la compacité et induit une structuration naturelle du sol. Sur ces mêmes types de sol, Radford *et al.* (2000) ont constaté une augmentation considérable des rendements de blé, conséquence d'une amélioration des propriétés physiques du sol et de son stockage d'eau. Cavanagh *et al.* (1991) ont constaté une amélioration des variables chimiques (matière organique, azote), physiques (humidité, densité apparente) et hydrodynamiques de la qualité de la surface (0-100 mm) du sol sous le NL en comparaison avec le labour conventionnel au pulvérisateur à disques après 3 ans d'expérimentation seulement.

L'installation des cultures et le contrôle des mauvaises herbes par des interventions aratoires engendrent des pertes en matière organique sous rotations de culture continues (Studdent *et al.*, 1997). Ces pertes peuvent être réduites en introduisant des cultures fourragères dans les rotations ou en maintenant des niveaux importants de résidus des plantes en surface (Campbell et Zentner, 1993). Ainsi, la gestion du sol (à travers le labour), de la culture (à travers le choix des cultures en rotation) et des résidus des plantes affectent le niveau de carbone dans le sol et influencent les dynamiques et d'humification et de minéralisation et leur équilibre (Huggins *et al.*, 1998).

Cependant au Maroc, la gestion de ces trois composantes (sol, culture et résidus) est perturbée par les exigences et les nécessités des systèmes d'exploitation agricoles qui prélèvent du sol plus qu'ils ne fournissent. Les rotations deviennent de plus en plus intensives, les travaux du sol sont réalisés à des dates non favorables, dans des conditions d'humidité élevée, et les résidus des plantes sont exportés des terres cultivées et pâturées. La qualité du sol dans ces

conditions, souffre d'une déperdition de carbone et d'une déstabilisation des agrégats.

L'évaluation de la qualité du sol peut se faire à travers la quantification par des mesures standard de certains de ses indicateurs tels que : la stabilité structurale, la matière organique, la matière organique particulaire, l'azote total, le pH... (Doran & Parkin, 1994).

La matière organique (MO) est un composant fondamental du sol, qui contrôle en partie les propriétés physiques, chimiques et biologiques affectant sa capacité de production. Elle est considérée comme le principal indicateur de la qualité du sol (Larson & Pierce, 1991; Doran *et al.*, 1994). Elle joue un rôle très important dans le maintien de la stabilité structurale du sol, la rétention, l'infiltration de l'eau, favorise la diffusion de l'air, réduit l'érosion et contrôle la distribution des pesticides dans le sol (Gregorich, 1997).

La MO est la source principale d'azote dans le sol. C'est un composant labile nécessitant une source de renouvellement. Toutefois, la perturbation du sol par le labour provoque généralement une diminution du taux de la MO, favorise l'érosion éolienne et hydrique et de ce fait provoque un déclin de la productivité de la plante cultivée. Le maintien des résidus de récolte en surface du sol peut contribuer à la synthèse d'une nouvelle MO (Campbell & Zentner, 1993). Ainsi, il devient nécessaire de maintenir et même d'augmenter le contenu de des sols en MO pour améliorer leur fertilité et assurer une agriculture durable en augmentant le taux de séquestration des résidus de récolte (Unger, 1994).

Dans les zones semi-arides où la décomposition de la MO est influencée par les conditions de sécheresse (Campbell *et al.*, 1996), l'adoption du non labour réduit l'évaporation et par conséquent les pertes en eau, améliore les rendements et favorise l'accumulation de la MO par l'incorporation des résidus de récolte (Campbell et Janzen, 1995).

La MO constitue souvent le ciment organique liant les fines particules entre elles et formant ainsi les agrégats (Quirk, 1978; Tisdall & Oades, 1982; Elliott, 1986). Elle ralentit la pénétration de l'eau de pluie dans les agrégats et permet l'augmentation du taux des agrégats hydrostables (Greenland, 1981; Tisdall & Oades, 1982; Albrecht, 1998). La stabilité structurale est étroitement liée à la quantité et la qualité de la MO (Angers & Chenu, 1997; Feller & Beare, 1998). La MO influence l'emmagasinement de l'eau par le sol, la résistance aux agents érosifs et par conséquent affecte la croissance et le développement des cultures (Piccolo, 1996). La qualité de la MO est susceptible à changer avec les différents systèmes de gestion des sols (Cambardella & Elliott, 1992; Gregorich & Carter, 1997; Oades, 1998; Piccolo & Mbaywu, 1999; Balesdent *et al.*, 1999).

La matière organique particulaire (MOP) a été définie par Elliott et Cambardella (1991) et Cambardella et Elliott (1992) comme étant la fraction labile de la MO physiquement protégée contre la biodégradation par sa localisation dans les agrégats du sol. Elle est généralement trouvée plus sensible aux techniques de gestion des sols que la matière organique totale. Gregorich & Ellert (1993) ont même suggéré de l'inclure comme indicateur de la qualité du sol.

Au Maroc, l'étude des effets combinés du labour et des rotations céréalières sur la MO et la structure du sol n'a pas été abordée jusqu'à présent à cause des difficultés à détecter des changements dans la qualité du sol. En effet, pour déceler les effets des systèmes de cultures et de travail du sol sur, l'agrégation, un suivi à long-terme est nécessaire (Janzen, 1995; Saber *et al.*, 1999).

De ce fait l'objectif spécifique de cette étude est de quantifier l'effet de différents systèmes de cultures et de travail du sol sur la qualité d'un sol argileux gonflant après 11 ans d'expérimentation.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude a été réalisée dans le domaine expérimental de Sidi El Aydi de l'Institut National de la Recherche Agronomique (latitude 33° 00' N longitude 09° 22' W), situé à 15 kilomètres au Nord de Settât dans la plaine de la Chaouia. Le sol est calcimagnésique à caractère vertique moyennement profond. Il est caractérisé par une structure faiblement développée, un « self mulch » de 5 cm en surface qui se gonfle à l'état humide et se fissure à l'état sec. Certaines propriétés physiques et chimiques de ce sol sont illustrées dans le *tableau 1*. La moyenne annuelle des précipitations est de 358 mm, comme indiqué au *tableau 2*. Dans cette station, un site expérimental de long-terme a été installé en 1987 dans le but d'évaluer l'effet des systèmes de labour et des rotations céréalières sur la production du blé et sur la qualité du sol, et d'identifier le système de conduite adéquat pour la production du blé dans les zones semi-arides du Maroc.

Tableau 1 - Propriétés générales du sol à Sidi El Aydi en 1987.

Table 1 - General soil properties of Sidi El Aydi.

| Propriétés | Profondeur (0 - 200 mm) |
|---|--------------------------|
| Type de sol | calcimagnésique vertique |
| Argile % | 53 |
| Limon % | 25 |
| Sable % | 21 |
| Graviers | moins de 1 % |
| Texture | argileuse |
| pH (eau) | 8,25 |
| Carbone organique % | 1,3 |
| Calcaire % | 20 |
| Capacité d'échange cationique meq/l | 55 |
| Densité apparente à sec (g m ⁻³) | 1,23 |
| Humidité à 0,3 bar (m ⁻³ m ⁻³) | 0,38 |
| Humidité à 15 bars (m ⁻³ m ⁻³) | 0,19 |

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est un split-plot en blocs aléatoires complet à 4 répétitions. Le facteur principal est la rotation avec cinq niveaux (Blé-Blé « BB », Jachère-Blé « JB », Jachère-Blé-Maïs « JBM », Jachère-Blé-Lentilles « JBL » et Jachère-Blé-Fourrage « JBF »). Chaque parcelle 12x30 cm relative à une phase de la rotation est divisée en deux sous parcelles 6x30 cm, l'une labourée et l'autre non labourée (semis direct).

Certaines transformations ont été opérées en 1993 (i) remplacement du minimum labour (sweep) par le labour conventionnel au pulvérisateur à disques (LC); (ii) élimination des rotations biennales blé/pois chiche et blé/fève; (iii) introduction des rotations triennales jachère/blé/lentille, jachère/blé/fourrage et jachère/blé/maïs (El Brahli *et al.*, 1997).

Conduite de l'essai

Semis

Le blé (*Triticum aestivum* L.), fourrage [mélange de vesce (*Vicia sativa* L.) et d'avoine (*Avena sativa* L.)] et la lentille (*Lentis culinaris* L.) sont semés à l'aide d'un semoir commercial direct à double disques semeurs, simple disque ouvreuse et des roues tasseuses de marque « TYE ». Ce semoir permet des espacements de 25 cm entre les lignes du semis. Le maïs (*Zea mays* L.) est semé à la main.

Tableau 2 - Moyennes mensuelles des précipitations et des températures de 1967 à 1998, Sidi El Aydi Settât, Maroc.

Table 2 - Monthly average precipitation and air temperatures 1967-1998 in Sidi El Aydi, Settât, Morocco.

| Mois | Température (°C) | | Précipitations (mm) |
|------------------|------------------|---------|---------------------|
| | Minimum | Maximum | |
| Janvier | 6,0 | 20,0 | 59 |
| Février | 7,2 | 21,3 | 56 |
| Mars | 8,7 | 23,7 | 46 |
| Avril | 10,3 | 25,3 | 40 |
| Mai | 12,7 | 27,4 | 14 |
| Juin | 15,9 | 30,6 | 3 |
| Juillet | 18,0 | 34,4 | 1 |
| Août | 20,2 | 31,8 | 0 |
| Septembre | 18,2 | 31,6 | 5 |
| Octobre | 12,8 | 28,7 | 27 |
| Novembre | 10,1 | 24,1 | 49 |
| Décembre | 8,4 | 21,4 | 58 |
| Moyenne ou total | 12,4 | 26,7 | 358 |

Les dates et les doses de semis sont : Blé (Achtar ou Tilila) : début novembre de chaque année à 120 kg/ha, Fourrage (mélange de vesce et d'avoine) : début Novembre de chaque année à 100 kg/ha, Lentille (Bakria) : début Novembre de chaque année à 40 kg/ha et un espacement de 50 cm, et le Maïs (Kamla) : fin février début mars de chaque année à 60 000 pieds/ha

Fertilisation

Les apports des fertilisants ont été faits suivant les recommandations des laboratoires de sciences du sol du centre aridoculture (INRA, Settat). Au moment du semis, les différentes cultures reçoivent un apport de 75 kg/ha de nitrate d'ammonium et 100 kg/ha phosphate supertriple. 50 kg d'urée sont apportés sur le blé au début du tallage et sur le maïs à la moitié du cycle.

Contrôle des mauvaises herbes

En conditions de non-labour, plusieurs stratégies de désherbage chimique ont été testées au cours des 11 années d'expérimentation, le *tableau 3* résume les plus récentes. Dans les traitements labourés, le contrôle des adventices est réalisé au pulvérisateur à disques, en été après la récolte (juin) et le semis de la culture suivante, ainsi que dans les jachères selon l'abondance des mauvaises herbes.

Traitement phytosanitaire

Pour lutter contre la cécidomyie, Carbofuran (Furadan 5G) est incorporé avec les semences au moment du semis à raison de 25 kg/ha. Pour lutter contre les maladies foliaires des céréales, un traitement fongique préventif à base de Propiconazole (Tilt) est utilisé à une dose de 0,5 l/ha.

Travail du sol

Un travail primaire au pulvérisateur à disque (10 à 15 cm de profondeur) est effectué en fin de récolte pour enfouir les résidus. Plusieurs autres passages de cet outil sont effectués pour préparer les lits de semences. Par contre, en parcelle non labourée, la seule manipulation aratoire consiste en une ouverture de 2 à 3 cm du sol pour placer la semence à 5 cm de profondeur, réalisée par un semoir spécial semis direct.

Echantillonnage

Les prélèvements des échantillons de sol ont été effectués en Juillet-Août 1998 à l'aide d'une pelle pour l'horizon de surface (0-2,5 cm) et d'une tarière pour les horizons (2,5-7 cm et 7-20 cm). Avant chaque échantillonnage dans les parcelles non labourées, les résidus en surface ont été écartés. Deux prélèvements ont été effectués par sous parcelle jachère (JB, JBL, JBM et JBF) et quatre prélèvements par sous parcelle blé continu (BB). Environ 300 g de sol par prélèvement ont été ramenés au laboratoire pour être analysés. Tous les prélèvements ont été réalisés à raison de 4 répétitions par rotation.

Tableau 3 - Désherbage chimique.

Table 3 - Chemical weed control.

| Culture | Herbicide utilisé |
|--------------|---|
| Blé | Glean (10 g/ha) ou Granstar (22 g/ha) |
| Maïs | Simazine (2 litres/ha) |
| Lentilles | Simazine (1 litre/ha) |
| Vesce+Avoine | Glean (10 g/ha) |
| Jachère | Glean (20 g/ha) + Gramoxone (3 litres/ha) |

Méthodes de mesures

Stabilité structurale

La stabilité structurale à sec a été évaluée par la méthode de tamisage à sec (Youker et McGuinness, 1956). Une prise de sol (150 g), séchée à l'air libre, est mise dans une colonne de tamis de mailles 10, 8, 6, 5, 4, 2, 1 et 0,25 mm, animée d'un mouvement à 1440 vibrations/mn pendant 5 minutes. Le refus de chaque tamis est pesé (Wi en g). L'indice de stabilité à sec est défini par le diamètre moyen pondéral « DMP » calculé à partir de la formule suivante :

$$DMP = \sum Xi.Wp$$

Xi = diamètre moyen de deux classes de tamis successifs

Wp = (masse des agrégats correspondant à chaque classe Wi)/150 g.

La stabilité structurale à l'eau est déterminée par la méthode Kemper et Rosenau (1986). Quatre grammes de la fraction (1 - 2) mm obtenus lors du tamisage à sec (stabilité à sec) sont déposés dans un tamis (70 µm) animé d'un mouvement alternatif et plongé dans un gobelet contenant 100 ml d'eau distillée pendant 3 minutes. Les agrégats instables à l'eau se trouvent en suspension dans le gobelet, leur masse est pesée après séchage à l'étuve pendant 24 heures. La masse pesée correspond à la masse des agrégats instables à l'eau (MAI en g). Le tamis contenant les agrégats restants, les débris de végétaux et les particules de sable est animé de nouveau d'un mouvement alternatif vertical dans un gobelet contenant 100 ml d'une solution d'hexametaphosphate de sodium (2 g/l) jusqu'à dispersion complète (30 minutes environ). Les particules en suspension dans la solution correspondent aux agrégats stables à l'eau et leur masse (MAS) est déterminée après passage à l'étuve pendant 24 heures à 105 °C. La masse du sable retenue dans le tamis est soustraite de la masse totale (4 g). Connaissant la masse des agrégats stables et les agrégats instables à l'eau on définit l'indice de stabilité (IS) à l'eau comme suit :

$$IS = [MAS/(MAS+MAI-MC)] * 100$$

MAS : masse des agrégats stables à l'eau (g)

MAI : masse des agrégats instables à l'eau (g)

MC : masse de l'hexametaphosphate de sodium ou calgon utilisé (g).

Le carbone organique a été déterminé par oxydation suivant la méthode de Walkey et Black (1934) décrite par Nelson et Sommers (1996). Le carbone organique est converti en matière organique en le multipliant par le facteur 1,724.

La matière organique particulaire a été évaluée par la méthode proposée par Cambardella et Elliott (Cambardella & Elliott, 1992). Une prise d'échantillon (25 g) tamisée à 2 mm a été mise dans 100 ml d'une solution d'hexametaphosphate de sodium (5 g/l). Après agitation pendant une heure, l'échantillon est rincé plusieurs fois à l'eau distillée dans un tamis de maille 53 μm . La fraction de sol restante dans le tamis est séchée pendant 24 heures à 105 °C puis pesée, broyée et passée dans un tamis de maille 250 μm . Cette fraction est ensuite analysée pour son contenu en carbone et en azote.

L'azote total a été déterminé par la méthode de Kjeldahl décrite par Bremner & Mulvaney (1982).

Le pH a été mesuré par une électrode précalibrée dans une solution 1:2 sol : eau (Mc Lean, 1982).

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel statistique SAS (SAS, Inc, 1990). L'analyse de la variance a été utilisée pour trouver l'effet significatif du labour et de la rotation sur les paramètres de la qualité du sol. Le test de la plus petite différence significative (PPDS $P < 5\%$) a été utilisé pour différencier entre les traitements (Snedecor et Cochran, 1980).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'interaction entre le travail du sol et la rotation des cultures n'est pas statistiquement significative pour toutes les variables étudiées.

Stabilité à sec

Il ressort des différents résultats que le NL favorise la stabilité à sec dans les deux couches de surface (0-2,5 cm) et (2,5-7 cm) en comparaison avec le LC. Dans la couche 7-20 cm l'indice de stabilité à sec (DMP) est plus élevé sous LC que sous le NL (*tableau 4*). Le DMP élevé sous le NL a été déjà signalé par Unger & Fulton (1990) et Archad *et al.* (1994).

Dans la couche de surface les rotations incluant la jachère présentent des indices (DMP) comparables et plus élevés comparativement à la rotation blé continu.

Les effets les plus distincts ont été observés dans la couche 2,5-7 cm où la rotation JB présente une meilleure stabilité à sec. Dans l'horizon 7-20 cm exceptionnellement la rotation JBL montre le DMP le plus élevé alors que la rotation BB montre le DMP le plus faible. Les autres rotations présentent des indices intermédiaires.

A long-terme, tous les systèmes de culture améliorent la stabilité à sec de ce sol en comparant ces résultats à ceux obtenus par

Kacemi (1992). Cet auteur n'a pas trouvé de différence significative du DMP entre les différentes rotations après 4 ans d'expérimentation.

Stabilité à l'eau

Le sol sous le NL montre une amélioration de la stabilité structurale à l'eau en comparaison avec le labour conventionnel (LC) dans les trois couches.

Suivant les rotations, la rotation BB a montré l'IS le plus élevé (72 %), les rotations triennales des indices intermédiaires (58 %) et la rotation JB l'indice le plus faible (48 %) au niveau de la couche superficielle (0-2,5 cm) (*tableau 4*).

Dans la couche intermédiaire (2,5-7 cm), les valeurs trouvées de IS au niveau des rotations JBF et BB sont comparables et plus élevées en comparaison avec les autres rotations.

Pour la couche (7-20 cm), les rotations JBF et JBM présentent les indices les plus faibles, alors que la différence entre les rotations BB et JB n'est pas significative. Particulièrement, on trouve que la rotation JBL favorise la stabilité structurale à l'eau dans la couche (7-20 cm), ce qui confirme la stabilité à sec élevée sous cette rotation. Ces résultats nous permettent de dire que la qualité des résidus incorporés ou retenus à la surface a une influence sur la stabilité à l'eau de la couche superficielle. En comparant ces résultats avec ceux déjà trouvés par Kacemi (1992) dans le même site on constate une amélioration de la stabilité structurale dans toutes les parcelles sous le non labour. Les différences entre les rotations au niveau profond (7-20 cm) pourraient être dues au type de système racinaire de chaque culture dans la rotation.

Carbone total dans le sol (C_0)

Le carbone organique total dans le sol est plus élevé dans les couches (0-2,5 et 2,5-7 cm) sous le NL que sous le LC, alors que dans la couche (7-20 cm) on ne distingue pas de différence significative entre les deux systèmes de labour (*tableau 5*). Le non retournement du sol sous le NL est responsable de l'accumulation du carbone organique à la surface du sol, alors que le contenu faible en carbone du sol sous le LC peut être imputé à une minéralisation élevée.

Les résultats comparables dans la couche (7-20 cm) nous permettent de conclure que la concentration du carbone à la surface du sol n'a pas de répercussions négatives sur la couche profonde en comparant le LC au NL. Il y a une stratification du carbone organique en surface sous NL, sans appauvrissement en cet élément en profondeur.

Concernant l'effet des rotations céréalières, la rotation BB a montré le taux de carbone organique le plus élevé dans les deux couches de surface (0,2,5 et 2,5-7 cm), alors que les rotations JB et JBL montrent le taux le plus faible. Les rotations JBF et JBM indiquent des taux de carbone organique intermédiaires dans la couche (0-2,5 cm). Le taux de C_0 dans l'horizon 7-20 cm présente des valeurs comparables pour toutes les rotations.

Les différents effets des rotations sur le taux de C_0 reflètent l'im-

Tableau 4 - Effet de la rotation et du travail du sol sur la stabilité structurale.**Table 4** - Water stability and dry aggregation as affected by wheat rotations and tillage systems.

| Profondeur de l'horizon | 0 - 2,5 cm | | 2,5 - 7 cm | | 7 - 20 cm | |
|-------------------------|------------------|-----------------|------------|-------|-----------|------|
| | DMP ^a | IS ^b | DMP | IS | DMP | IS |
| Travail du sol | | | | | | |
| Non-Labour NL | 3,78 A | 59 A | 4,52 A | 54 A | 2,85 B | 51 A |
| Labour LC | 3,21 B | 58 A | 3,51 B | 48 B | 4,11 A | 44 B |
| Rotation | | | | | | |
| BB | 3,02 B | 72 A | 4,37 B | 57AB | 2,56 C | 50 A |
| JB | 3,61 A | 48 C | 5,04 A | 42 C | 3,31 B | 51 A |
| JBF | 3,74 A | 57 B | 3,65 C | 60 A | 3,79 AB | 44 B |
| JBM | 3,37 A | 58 B | 4,32 B | 49 BC | 3,40 B | 42 C |
| JBL | 3,74 A | 60 B | 2,69 C | 48 BC | 4,40 A | 51 A |
| Moyenne générale | 3,49 | 59 | 4,01 | 51 | 3,48 | 48 |

^a : diamètre moyen pondéral des agrégats secs en mm

^b : indice de stabilité en % d'agrégats hydrostables

Pour une même colonne les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $p=0,05$ (test LSD).

Tableau 5 - Effet de la rotation et du travail du sol sur le carbone organique du sol et le carbone de la matière organique particulaire.**Table 5** - Total carbon and carbon of particulate organic matter as affected by wheat rotations and tillage systems.

| Profondeur de l'horizon | 0 - 2,5 cm | | 2,5 - 7 cm | | 7 - 20 cm | |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | C _O | C _P | C _O | C _P | C _O | C _P |
| Rotation | | | | | | |
| BB | 2,27 A | 4,05 A | 1,59 A | 4,61 A | 1,16 BC | 2,18 A |
| JB | 1,69 B | 2,70 C | 1,37 B | 2,24 B | 1,24 AB | 2,04 A |
| JBF | 1,87 B | 3,43 B | 1,51 A | 2,66 B | 1,47 A | 2,28 A |
| JBM | 1,91 B | 3,21 BC | 1,40 B | 2,47 B | 1,13 C | 2,12 A |
| JBL | 1,68 C | 3,58 AB | 1,49 B | 2,46 B | 1,32 A | 2,08 A |
| Travail du sol | | | | | | |
| NL | 2,31A | 4,11 A | 1,42 B | 2,74 B | 1,23 A | 1,98 B |
| LC | 1,45 B | 2,68 B | 1,45 A | 3,04 A | 1,22 A | 2,30 A |
| Moyenne générale | 1,88 | 3,39 | 1,43 | 2,88 | 1,22 | 2,14 |

C_O : Carbone organique du sol en %

C_P : Carbone organique de la matière organique particulaire en %

Pour une même colonne les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $p=0,05$ (test LSD).

portance des caractéristiques morphologiques des différentes cultures et le type de résidus dans l'amélioration du taux de C_O dans le sol (Dinel & Gregorich, 1995). Ces résultats s'accordent avec ceux trouvés par Wood *et al.* (1990) et Janzen *et al.* (1998), qui recommandent la réduction de la fréquence de la jachère en rotation pour favoriser le taux de séquestration du C_O dans le sol.

Azote total dans le sol (N_T)

L'azote total dans cette expérimentation se trouve influencé par le labour et la rotation des cultures (*tableau 6*). Les différences importantes en azote s'observent au niveau de la zone du semis (0-7 cm) où des perturbations importantes sont apportées. Le NL conserve plus d'azote que le LC dans les deux couches (0-2,5 et 2,5-

Tableau 6 - Effet de la rotation et du travail du sol sur le taux d'azote du sol et de la matière organique particulaire.**Table 6** - Total nitrogen and nitrogen of particulate organic matter as affected by wheat rotations and tillage systems.

| Profondeur de l'horizon | 0 - 2,5 cm | | 2,5 - 7 cm | | 7 - 20 cm | |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | N _T | N _P | N _T | N _P | N _T | N _P |
| Rotation | | | | | | |
| BB | 0,182 A | 0,214 A | 0,151 A | 0,163 A | 0,122 A | 0,125 AB |
| JB | 0,146 C | 0,125 C | 0,148 AB | 0,115 C | 0,119 A | 0,114 BC |
| JBF | 0,154 BC | 0,149 B | 0,140 BC | 0,133 B | 0,117 A | 0,135 A |
| JBM | 0,160 B | 0,162 B | 0,133 C | 0,130 B | 0,118 A | 0,114 BC |
| JBL | 0,151 BC | 0,169 B | 0,135 C | 0,124 B | 0,120 A | 0,113 C |
| Travail du sol | | | | | | |
| NL | 0,184 A | 0,195 A | 0,149 A | 0,138 A | 0,120 A | 0,115 B |
| LC | 0,133 B | 0,132 B | 0,134 B | 0,128 B | 0,120 A | 0,126 A |
| Moyenne générale | 0,159 | 0,164 | 0,141 | 0,133 | 0,120 | 0,121 |

N_P : Azote de la matière organique particulaire en %

N_T = Azote total du sol en %

Pour une même colonne les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à p=0,05 (test LSD).

7 cm), alors que dans la couche (7-20 cm) les deux systèmes de labour présentent des teneurs comparables.

L'effet de la rotation sur l'azote total est bien illustré dans les deux couches de surface où la rotation BB concentre plus d'azote que les autres rotations, alors que la rotation JB présente la concentration la plus faible. Dans la couche (7-20 cm), les concentrations en azote sont comparables entre les rotations.

Carbone de la matière organique particulaire (C_P)

Le carbone organique de la matière organique particulaire est plus concentré dans la couche superficielle (0-2,5 cm) sous le NL que sous le LC. Dans les deux autres couches, on a un effet inverse où les résultats montrent une concentration significativement différente entre le NL et le LC en faveur de ce dernier du fait du retournement du sol et l'homogénéisation de la répartition des résidus des récoltes précédentes.

Les rotations triennales montrent des concentrations intermédiaires entre la rotation BB (élevée) et la rotation JB (faible) au niveau de la couche (0-2,5 cm). Dans la couche intermédiaire (2,5-7 cm), la rotation BB montre le taux le plus élevé alors que les différences entre les autres rotations sont statistiquement non significatives. La couche (7-20 cm) présente des taux de carbone particulaire comparables pour toutes les rotations (tableau 5).

Azote de la matière organique particulaire (N_P)

Le travail du sol a un effet très significatif sur l'azote total de la MOP dans les trois horizons. Le taux de N_P est élevé sous le NL dans

les deux horizons de surface, alors que dans l'horizon (7-20 cm) le LC manifeste le taux le plus élevé. Il y a un enrichissement en azote organique et particulaire en surface sous le non-labour, alors que le même sol présente une déperdition en ces éléments sous le labour.

La rotation présente un effet différentiel sur N_P. Les concentrations en azote total dans la MOP dans les différentes rotations se répartissent de la façon suivante : BB > rotations triennales > rotation JB au niveau des deux couches (0-2,5 et 2,5-7 cm) (tableau 6). Dans la couche (7-20 cm), la rotation JBF présente le taux le plus élevé suivi des rotations JB et JBM alors que la rotation JBL présente le taux le plus faible.

pH

Le pH augmente suivant la profondeur pour toutes les rotations. Les rotations BB et JB, présentent en général des pH faibles par rapport aux autres rotations dans les trois couches (tableau 7). Les valeurs du pH varient de 7,6 à 8 suivant les rotations dans la couche (0-2,5 cm). Dans cette même couche les rotations triennales JBF, JBM et JBL présentent des valeurs identiques. Cette désalcalinisation peut être reportée au taux de séquestration de la matière organique sous ces différentes rotations.

Concernant le travail du sol, les résultats montrent une baisse du pH de 0,2 unité entre le LC et le NL dans la couche (0-2,5 cm), alors que les valeurs du pH dans les deux autres couches sont identiques pour les deux traitements. En effet, Karlen *et al.* (1994) ont signalé une différence de 0,4 unité de pH entre le NL et le LC après 12 ans d'expérimentation sous la rotation maïs continu. Blevins *et al.* (1985) ont indiqué que le NL favorise la désalcalinisation à la sur-

Tableau 7 - Effet de la rotation et du travail du sol sur le pH du sol.**Table 7** - Soil pH as affected by wheat rotations and tillage systems.

| Profondeur de l'horizon | 0 - 2,5 cm | 2,5 - 7 cm | 7 - 20 cm |
|-------------------------|------------|------------|-----------|
| Rotation | | | |
| BB | 7,6 B | 7,9 B | 8,1 B |
| JB | 7,7 B | 8,0 B | 8,1 B |
| JBF | 8,0 A | 8,1 A | 8,3 A |
| JBM | 8,0 A | 8,2 A | 8,2 A |
| JBL | 8,0 A | 8,1 A | 8,2 A |
| Travail du sol | | | |
| NL | 7,8 B | 8,1 A | 8,2 A |
| LC | 8,0 A | 8,0 A | 8,2 A |
| Moyenne | 7,9 | 8,1 | 8,2 |

Pour une même colonne les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $p=0,05$ (test LSD).

face du sol particulièrement lorsqu'on a un apport important de fertilisants. On pense que cette diminution du pH peut être bénéfique pour les sols calcaires marocains en termes d'apport en fertilisants, spécialement pour le phosphore et l'azote.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Après 11 ans d'expérimentation, le système non labour a modifié les propriétés du sol. L'augmentation de la séquestration de la matière organique et de la concentration de la matière organique particulaire s'est traduite par une amélioration de l'agrégation et de la structure du sol. L'accumulation de la matière organique à la surface du sol sous semis direct a permis l'enrichissement des couches superficielles en azote et carbone sans appauvrissement des couches profondes en comparaison avec le labour conventionnel au pulvérisateur à disques, d'une part. D'autre part, on constate une désalcalinisation assez prononcée du sol, qui peut être très bénéfique pour les sols calcaires marocains en terme d'efficacité d'utilisation de fertilisants et de disponibilité de certains éléments nutritifs, spécialement le phosphore et l'azote.

La rotation blé continu (BB) a permis le niveau de séquestration le plus élevé de la matière organique, mais sa pratique en zones semi-arides reste limitée aux sols en pente et peu profonds.

Ainsi on peut dire qu'à travers les indicateurs physiques et chimiques étudiés (stabilité structurale, matière organique, azote total, matière organique particulaire et pH), la qualité de ce sol argileux gonflant a été améliorée sous semis direct à des degrés variés selon les rotations pratiquées en milieu semi-aride marocain.

Les interactions simultanées entre les facteurs d'agrégation et ceux de la séquestration de la matière organique doivent être étudiés plus profondément. Les tendances dans ces changements

doivent faire l'objet d'une modélisation en vue de transférer les résultats acquis et de tester d'autres systèmes de conservation du sol.

REMERCIEMENTS

La Fondation Internationale pour la Science est remerciée pour son octroi d'un support financier au co-auteur (Dr. Rachid Mrabet). Melles F. Bessam et S. Lahlou sont remerciées pour leur contribution aux différentes analyses au laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

- Albrecht A., 1998 - La matière organique et la stabilité structurale des horizons de surface des sols ferrallitiques argileux. Effet du mode de gestion des terres. Thèse de l'Université Nancy 1, France
- Angers, D.A. and Chenu, C., 1997 - Dynamics of soil aggregation and C sequestration. In: Lal, R., Kimble, J., Follet, R.F., Stewart, B.A (Eds), Soil process and the carbon Cycle. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 199-206.
- Arshad M.A., Gill, K.S. and Coy G.R., 1994 - Wheat yield and weed population as influenced by three tillage systems on a clay soil in temperate continental climate. Soil Tillage Res. 28, 227-238.
- Balesdent J. C. Chenu and M. Balabane, 2000 - Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. Soil & Tillage Research. 53. 215-230.
- Bouzza A., 1990 - Water conservation in wheat rotations under several management and tillage systems in semiarid areas. Ph.D. Dissertation. University of Nebraska, Lincoln, NE USA. 200p.
- Cambardella C.A. and Elliott, E. T. C. A., 1992 - Particulate soil organic matter changes across a grass land cultivation sequence. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 777-783.
- Campbell C.A. and R.P Zentner, 1993 - Soil Organic Matter as influenced by crop rotations and fertilizer. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 1034-1040.
- Campbell C.A., and H.H. Janzen, 1995 - Effect of tillage on soil organic matter. P 9-11 in Farming for a better environment. SWCS, Ankeny, IA, USA.
- Campbell C.A., B.G. McConkey, R. P. Zentner, F. Selles and D. Curtin, 1996 - Long-

- term effects of tillage and crop rotations on soil organic matter and total N in a clay soil in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 76:395-401.
- Cavanagh P.P, A.J. Koppi and A.B. Mc Bratney, 1991 - The effects of minimum cultivation after three years on some physical and chemical properties of a red brown earth at Forbes, NSW.Aust.J.SR 29 : 263-270.
- Dinel H. and E. Gregorich, 1995 - Structural stability status as affected by long-term continuous maize and Bluegrass sod treatments. *Biological Agriculture and Horticulture*. 2:237-252.
- Doran J.W., 1980 - Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 : 765-771.
- Doran J.W. and Parkin T.B., 1994 - Defining and assessing soil quality. In J. Doran *et al.* (eds.). *Defining Soil quality for a sustainable environment*. SSSA Spec. Publ. N° 35. p: 3-21. SSSA and ASA Madison, WI.
- Doran J.W., D.C. Coleman, D.F. Bezdicsek and B.A. Steward, 1994 - Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Spec. Publ. 35. ASA and SSSA, Madison, WI. USA.
- El-Brahli A., Bouzza A. et Mrabet R. 1997 - Stratégies de lutte contre les mauvaises herbes dans plusieurs rotations céréalières en conditions de labour et de non- labour. Rapport d'activité 96-97. INRA Centre Aridoculture Settat, Maroc.
- Elliott E. T., 1986 - Aggregate structure, carbon, nitrogen and phosphorus native and cultivated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:627-633.
- Elliott E. T. and Cambardella C.A., 1991 - Physical separation of soil organic matter. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34 : 407- 419.
- Feller C. and Beare M.H., 1998 - Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, 69-116.
- Greenland D. J., 1981 - Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.*, 32: 301-322.
- Gregorich E.G., Monreal B.H., Ellert B. H., Angers D.A. & Carter M.R., 1993 - Evaluating changes in soil organic matter. p: 10-1-10-17. In D.F. Acton. (ed). *A program to assess and monitor soil quality in Canada: Soil quality evaluation program summary (interim)*. Center Land and Biol. Res. Contr. 93-49. Agric-Res. Branch, Agric. Canada, Ottawa.
- Gregorich E.G. and M.R. Carter, 1997 - Soil quality for crop production and ecosystem health. *Developments in Soil Science* 25. Elsevier, NY. USA.
- Harvin J.L., D.E. Kissel, L.D. Maddux, M.M. Claassen and J.H. Long, 1990 - Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:1515-1519.
- Janzen J.L., Campbell C.A., Izaurralde, R.C. Ellert, B.H. Juma, N., McGill W.B. and Zentner R.P., 1998 - Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil Tillage Res.* 47, 181-195.
- Janzen H.H., 1995 - The role of long-term sites in agro-ecological research: a case study. *Can. J. Soil Sci.* 75:123-133.
- Kacemi M., 1992 - Water conservation, crop rotations and tillage systems in semiarid Morocco. Ph.D. Dissertation. Colorado State Univ. Fort Collins, CO. USA. 203 p.
- Kacemi M., G.A. Peterson and R. Mrabet, 1995 - Water Conservation, Wheat-Crop Rotations and Conservation Tillage Systems in A Turbulent Moroccan Semi-Arid Agriculture. *International Dryland Agriculture Conference*. May 1994, Rabat, Morocco. 200 p.
- Karlen D.L., N.C. Wollenhaupt, D.C. Erbach, E.C. Berry, J.B. Swan, N.S. Eash and J.L. Jordahl, 1994 - Long-term tillage effects on soil quality. *Soil & Tillage Research* 32:313-327.
- Kemper W.D., and Rosenau, R.C., 1986 - Aggregate stability and size distribution. In: A. Klute (ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy Monograph, 2nd ed. Madison, Wisconsin, pp. 425-442.
- Larson W.E. and Pierce F. J., 1991 - Conservation and enhancement of soil quality. In *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*. Vol.2: Technical Papers. Bangkok, Thailand: International Board for soil research and management, 1991. IBSRAM. Proceedings N° 12.(2).
- Lopez-Bellido L. 1992 - Mediterranean cropping systems. P: 311-356. In *Ecosystems of the World, Field crop ecosystems*. Pearson, C.J. (ed). Elsevier.
- McLean E.O., 1982 - Soil pH and lime requirements. In *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*. Page *et al.* (eds.). pp. 199-244. American Society Agronomy Monograph Madison, Wisconsin.
- Mc Garry D., B.J Bridge and B.J Radford, 2000 - Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of alluvial soil in the semiarid subtropics. *Soil & Tillage Research*. 53 : 105-115
- Mrabet R., 2000 - Differential response of wheat to tillage management systems in a semiarid area of Morocco. *Field Crops Research*. 66 : 165-174.
- Mrabet R. and A. Bouzza, 2000 - Influence of tillage, residue management and cropping systems on wheat production in a turbulent semiarid area of Morocco. *International Crop Science Conference*, 17-22 Août 2000. Hamburg, Germany.
- Mrabet R., 1997 - Crop residue management and tillage systems for water conservation in a semiarid area of Morocco. PhD dissertation. Colorado State Univ. Fort Collins, CO. USA. 220 p.
- Mrabet R., Bouzza A., and Peterson G.A., 1993 - Potential reduction of soil erosion in Morocco using no-till systems. *Agron. abstract p.* 323 *Am. Soc. Agron.* Madison, WI, USA.
- Nelson D.W. and L.E. Sommers, 1996 - Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of soil analysis part 3. Chemical methods*, SSSA Book Series n° 5.
- Oades J.M., 1998 - Particulate Organic Matter. In *Humic Substances Downunder: Understanding and managing organic matter in soils, sediments and waters*. 9th International meeting of the International Humic substances society, 20-25 September, 1998. Adelaide, Australia.
- Piccolo A. and Joe S.C. Mbaywn, 1999 - Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63 : 1801-1810.
- Piccolo A., 1996 - Humus and soil conservation p 225-264. in A. Piccolo (Ed). *Humic substances in terrestrial ecosystems*. Elsevier Science B.V., Australia.
- Quirk, J.P. 1978 - Some physico-chemical aspects of soil structural stability - A review. In W.W. Emerson, *et al.*, (eds.) *Modification of soil structure*. John Wiley & Sons, 3-16.
- Radford B.J, B.J Bridge, R.J Davis, D. Mc Garry, U.P. Pillai, J.F Rickman, P.A. Walsh and D.F. Yule, 2000 - Changes in the properties of a vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. *Soil & Tillage Research*. 54 (3-4) : 155-170.
- Saber N., R. Mrabet, F. Bessam and S. Lahlou, 1999 - Influence of conservation tillage and cropping systems on quality of a semiarid Moroccan soil. *Fourth African Crop Science Conference*. October 11-14, 1999, Casablanca, Morocco.
- Snedecor G.W, Cochran, W.G., 1980 - *Statistical Methods*, 7th ed. Iowa State University Press, IA.
- Tisdall J.M. and J.M. Oades, 1982 - Organic matter and water stable aggregates in a soils. *J. Soil.Sci.* 33 : 141-164.
- Unger P.W., Fulton L.J., 1990 - Conventional- and no-tillage effects on upper root zone soil conditions. *Soil Tillage Res.* 2, 379-393.
- Unger P.W., 1994 - *Managing agricultural residues*. Lewis Publishers, NY. USA.
- Wood C.W., D.G. Westfall and G.A. Peterson, 1991 - Soil carbon and nitrogen changes on initiation of no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:470-476.
- Wood C.W., Westfall D.G. and G.A. Peterson., 1990 - Soil carbon and nitrogen changes on initiation of no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 470-476.
- Youker R.E. and J.L. McGuinness, 1956 - A short method of obtaining mean weight-diameter values of aggregate analysis of soils. *Soil Sci.* 83:291-294.

