

# Influence du système de travail du sol et de la rotation sur le statut organique d'un sol argileux dans le Maroc semi-aride

**Mrabet R.<sup>a</sup> et Ibno Namr K.<sup>b</sup>**

(a) Institut National de la Recherche Agronomique, Centre Régional de la Recherche Agronomique de Tanger. 78, Bd Sidi Mohamed Ben Abdellah Tanger 90010 Maroc.  
Tél : +212(0)539938033 ; fax : +212(0)539936681

(b) Université Chouaïb Doukkali, Faculté des Sciences, Laboratoire des Sciences des Sols, BP 20, El-Jadida, 24000 Maroc.

Auteur correspondant : [rachidmrabet@gmail.com](mailto:rachidmrabet@gmail.com)



## Résumé

*Une stratégie qui vise une agriculture durable doit tenir compte de l'évolution de la qualité du sol. Il faut donc adopter des systèmes de culture qui permettent l'amélioration de celle-ci. La présente étude permet d'évaluer le système non-labour, avec des variantes faisant intervenir les rotations des cultures et la gestion des résidus, pour son potentiel à améliorer le statut organique du sol dans le semi-aride marocain. Des expérimentations sont conduites au champ, depuis 1994, dans le but de suivre les effets du système de travail du sol, de la rotation et des résidus sur les paramètres de la qualité d'un sol calcimagnésique à caractère vertique. La conception expérimentale inclut la comparaison de parcelles soumises simultanément au labour conventionnel (LC) ou non-labour (NL), des rotations biennales (Blé-Blé «BB» et Jachère-Blé «JB») ou triennale (Jachère-Blé-Orge «JBO») et des niveaux de résidus différents sous NL : 0 t/ha ( $NL_0$ ), 1 t/ha ( $NL_1$ ) et 6 t/ha ( $NL_6$ ). Les résultats obtenus au bout de cinq années d'expérimentation montrent un effet positif sur le statut organique du sol du Non-Labour (NL) par rapport au Labour Conventionnel (LC), surtout près de la surface du sol. En effet, dans l'horizon 0-5 cm, la séquestration du carbone organique sous  $NL_1$  tend vers une amélioration (1.73%) par rapport au LC (1.66%). Alors que dans le même horizon, le carbone de la matière organique particulaire enregistre des différences plus significatives sous  $NL_1$  (0.92%) par rapport au LC (0.80%). En terme d'azote total et particulaire, les différences restent faibles entre  $NL_1$  (0.14% et 0.07%) et LC (0.13% et 0.07%). Les différences enregistrées diminuent avec la profondeur. Le pH (KCl) du sol a enregistré une baisse (0.05 unité) très significative sous  $NL_1$  dans les trois horizons étudiés par rapport au LC. La gestion des résidus a permis d'améliorer les différents indicateurs étudiés sous NL, et on a constaté d'une façon générale que le taux d'amélioration de ces indicateurs était proportionnel au taux de résidus laissés en surface, alors que l'exportation totale des résidus rendait NL moins avantageux que LC. La rotation JBO (mieux adaptée aux exigences des exploitations dans la région de la Chaouia) a permis une amélioration intermédiaire par rapport au BB et JB. Par conséquent, cinq années ont été suffisantes pour distinguer les influences du travail du sol, de la rotation et des résidus de récolte sur le statut organique du sol.*

**Mots clés :** *Semis direct, rotation, résidus, qualité du sol, séquestration du carbone organique, azote.*

## أثر عمليات الحراثة والدورة الزراعية للقمح على محتوى المادة العضوية للأرض الطينية بالمناطق شبة الجافة بالمغرب

المرابط رشيد وابن نمر خالد

### ملخص

شكلت احتياجات الاستدامة الزراعية للمناطق القاحلة بالمغرب شكلا خاصا لتطور جودة التربة. وتظهر أهمية التنمية وتبني الجدوى المحصولية والبيئية لإدارة التربة والمحصول للمناطق شبة الجافة بالمغرب. وقد صممت هذه الدراسة بغرض تقييم تأثير بعض المعاملات التي شملت الحراثة، ادارة البقايا، الدورة الزراعية للقمح على الجودة الكيميائية للتربة.

وقد تم البدء في التجربة عام 1994 وتكونت من 3 دورات زراعية للقمح (قمح على التواصل «BB»، قمح مع ترك الارض «JB»، قمح وشعير مع ترك الارض «JBO») مع استخدام نظامى حرث الزرع المباشر «NL»، الحراثة التقليدية «LC» وثلاثة طرق ادارة بقايا النباتات لنظام الزرع المباشر NL (الاحتفاظ بكل البقايا 6 طن/هكتار (NL<sub>6</sub>))، غطاء جزئى من البقايا (1 طن/هكتار NL<sub>1</sub>) وبدون غطاء نباتى 0 طن/هكتار (NL<sub>0</sub>)، وبعد 5 سنوات من استخدام NL<sub>1</sub> قد تطورت مقاييس المؤشرات الكيميائية لجودة التربة على السطح. فى طبقة 0-5 سم مع مقارنة NL<sub>1</sub>، LC، تم عزل لمستويات طفيفة من الكربون والمحتوى الكلى من النتروجين وهذا التطور كان من 1.66 الى 1.73% للكربون الكلى و 0.13 الى 0.14% للنتروجين الكلى على التوالى تحت نظامى LC و NL<sub>1</sub>. وقد كانت الفروق معنوية جدا بالنسبة للكربون والنتروجين فى المادة العضوية لنظام NL<sub>1</sub> عند المقارنة مع LC.

فى الافق الاعلى كانت القيم 0.92 و 0.07% من الكربون والنتروجين تحت نظام NL<sub>1</sub> 0.80 و 0.07% تحت نظام LC. وبشكل عام تتناقص عوامل جودة التربة بزيادة العمق مع حدوث نقص طفيف لمستوى pH<sub>KCl</sub> تحت نظام NL<sub>1</sub> فى الطبقة السطحية من التربة.

وتحت ظروف نظام NL كان التطور الحاصل فى جودة التربة كيميائيا نسبيا تبعا لمستوى البقايا على سطح التربة فى حين ان نظام اللاحراثة عان من نقص فى المحتويات لاغلب مؤشرات الجودة الكيميائية لسطح التربة عند المقارنة بنظام الحراثة التقليدية. وعامة مع تواصل زراعة القمح يحدث تحسن فى الخواص الكيميائية بينما مع نظام ترك الارض ودورة زراعية للقمح انخفضت مستويات المادة العضوية والنتروجين. وكان افضل نظام للتبنى هو 3 دورات زراعية (ترك الارض - قمح - شعير) حيث يسمح بتأثير تفاضلى على جودة التربة.

وقد كانت 5 سنوات كافية لتمييز اثر الحراثة وادارة المتبقيات والدورة الزراعية للقمح على جودة التربة كيميائيا.

**كلمات المفتاح:** الزرع المباشر، الدورة الزراعية، البقايا، فصل الكربون، النتروجين

## Influence of tillage and wheat rotation on organic matter content of a clay soil of semi-arid Morocco

### Abstract

*The requirements of agricultural sustainability for Morocco's drylands have created a vested interest in soil quality evolution as a result of management practices. The development and adoption of agronomically feasible and environmentally friendly soil and crop management systems are needed for semiarid Morocco. The present study was designed to evaluate the effects of treatments that involved tillage, residue management and wheat rotations on soil chemical quality (i.e. organic carbon, total nitrogen, labile carbon and nitrogen). The experiment, which was initiated in 1994, consisted of three wheat rotations (continuous wheat "BB", fallow-wheat "JB", fallow-wheat-barley "JBO"), two tillage systems (No-tillage "NL" and conventional tillage "LC") and three residue management practices for NL: retaining all residues 6 t/ha ( $NL_6$ ), partial residue cover 1 t/ha ( $NL_1$ ) and no residue cover 0 t/ha ( $NL_0$ ). On average, and after 5 years,  $NL_1$  improved measured chemical indicators of the soil quality at the surface. In the 0-5 cm soil layer, compared to LC,  $NL_1$  sequestered slightly higher levels of carbon (Ct). This improvement was from 1.66 to 1.73% of Ct. However, even though difference was statistically significant, practically the increase of Nt from 0.13 to 0.14% is not of great impact, respectively, under LC and  $NL_1$ . Differences in terms of nitrogen in particulate organic matter were not important between  $NL_1$  and LC (0.07%). In the top horizon, measured values were 0.92% and 0.80% of C in particulate organic matter under  $NL_1$  and LC. In general, soil quality parameters decreased with sampling depth. A light decrease of  $pH_{KCl}$  was also measured in  $NL_1$  in the soil surface layer. Under NL conditions, soil chemical quality improvement was proportional to the level of residues at the surface. However, the bare no-tillage treatment showed a loss in contents of most chemical quality indicators of the soil surface compared to conventional tillage. Overall, continuous wheat improved soil chemical quality, while the fallow-wheat rotation depressed soil organic and nitrogen levels. The 3-year rotation (fallow-wheat-barley) permitted differential effects on soil quality. Five years were sufficient to discriminate effects of tillage, residue management and wheat rotation on soil chemical quality.*

**Keys words:** No-tillage, rotation, residue, carbon sequestration, nitrogen.

## Introduction

Dans les zones semi-arides marocaines, les faibles précipitations et leur irrégularité (inter et intra annuelles) engendrent un déficit hydrique chronique qui influence la production du système blé (Cooper *et al.*, 1987). Cette situation difficile et aléatoire se trouve aggravée par les pratiques agricoles conventionnelles qui entraînent la détérioration de la qualité des sols. En effet, l'utilisation persistante des pratiques conventionnelles de gestion des sols a joué un rôle significatif dans l'évolution vers une agriculture non durable. La fertilité, la structure et la matière organique (MO) du sol baissent suite au labour et d'autres pratiques (pâturage, exportation de paille) qui empêchent l'incorporation du matériel organique dans le sol (Lopez-Bellido, 1992).

Pour permettre une agriculture durable dans les régions semi-arides marocaines, il a fallu chercher des systèmes de gestion agricole adéquats, qui permettent d'améliorer et de stabiliser les rendements tout en préservant la qualité du sol. En effet, l'adoption des systèmes de conservation (de l'eau et du sol) a montré que le système non-labour (NL) augmente le rendement du blé par rapport au labour conventionnel (LC) (Bouzza, 1990; Kacemi, 1992 et Mrabet, 1997), par l'augmentation de l'efficacité d'utilisation d'eau (Kacemi *et al.*, 1995). Cependant, des changements dans la qualité du sol peuvent aussi contribuer à cette amélioration.

Dans tout le bassin méditerranéen, le labour intensif détériore la qualité du sol et menace la production agricole à long terme (Lopez-Bellido, 1992). En Australie, le NL a considérablement augmenté les rendements de blé par l'amélioration des propriétés physiques, hydriques (Radford *et al.*, 1995), et chimiques (matière organique, azote) des sols argileux gonflants (Cavanagh *et al.*, 1991). Le semis direct a réduit les pertes en eau (par évaporation), a amélioré les rendements et a favorisé l'accumulation de la MO par l'incorporation des résidus de récolte (Campbell et Janzen, 1995).

La rotation permet d'augmenter les rendements, de rompre les cycles d'espèces nuisibles (plantes et parasites) et de favoriser la disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs, en particulier l'azote. L'insertion de la jachère, pratique traditionnelle très répandue au Maroc, dans la rotation permet d'améliorer d'avantage le système non labour (El Brahli et Mrabet, 2000). En effet, les rendements du blé tendre ont augmenté après une jachère chimique (Bouzza, 1990).

La gestion des résidus de récolte est une composante importante pour le succès du non-labour. En effet, le maintien des résidus à la surface du sol est responsable de l'amélioration de certains paramètres de la qualité du sol, puisqu'il protège le sol contre l'érosion et permet la séquestration de la matière organique (Doran, 1980 ; Harvin *et al.*, 1990 ; Wood *et al.*, 1991 ; Karlen *et al.*, 1994 ; Mrabet et Bouzza, 2000). En plus, les résidus de récolte contiennent des éléments nutritifs qui peuvent satisfaire partiellement la demande en fertilisants.

Dans les zones arides et semi-arides marocaines, le blé (*Triticum aestivum* L.) et l'orge (*Hordeum vulgare* L.) sont les céréales les plus cultivées et leurs chaumes et paille sont largement utilisées pour l'alimentation animale (Chriyaa *et al.*, 1996). Le choix d'une rotation triennale (i.e., Jachère-Blé-Orge) peut remédier au problème que pose l'élevage, à savoir la consommation des résidus, puisque la rotation biennale blé-Jachère exclut l'élevage dans l'exploitation, alors que l'introduction de l'orge dans la rotation peut supporter le cheptel en année sèche et résulter en une bonne production en grain en année favorable.

La matière organique (MO), la matière organique particulaire (MOP), l'azote total (Nt) et particulaire (Nmop) et le pH, sont des indicateurs qui permettent l'évaluation de la qualité du sol (Doran et Parkin, 1994). Certains auteurs considèrent la matière organique (MO) comme étant le principal indicateur de la qualité du sol (Larson et Pierce, 1991; Doran et Parkin, 1994). En effet, la MO influence l'emmagasinement de l'eau par le sol, facteur clé dans l'amélioration et la stabilisation de la production céréalière vis-à-vis des aléas climatiques et la sécheresse en milieu semi-aride marocain. Son rôle est important dans l'infiltration et la distribution de l'eau et des pesticides dans le sol (Gregorich et Carter, 1997). Elle contrôle aussi la formation des agrégats (Tisdall et Oades, 1982; Elliott, 1986) et maintient leur stabilité (Albrecht, 1998). Au Maroc, les données concernant les paramètres de la qualité du sol sont très récentes, puisque l'adoption du non labour avait pour objectif l'atténuation du déficit hydrique, et l'amélioration du rendement qui ont fait l'objet d'un suivi régulier. Le présent travail vient donc étudier les changements à moyen terme dans la qualité du sol sous non labour, ses objectifs se résument en (1) Etudier l'influence du système de travail du sol, de la rotation céréalière et de la gestion des résidus sur le statut organique du sol après cinq années d'expérimentation et (2) Sélectionner les indicateurs les plus sensibles aux changements des pratiques agricoles.

## Matériel et méthodes

### Site

L'expérimentation est installée dans la station expérimentale de l'INRA à Sidi El Aydi (latitude 33° 00' N longitude 09° 22' W), située dans la plaine de la Chaouia, à 15 km au nord de Settat, Maroc. Le sol est un calcimagnésique à caractère vertique moyennement profond, caractérisé par une structure faiblement développée et un "self mulch" de 5 cm en surface. Le sol se gonfle à l'état humide et se fissure à l'état sec. Du point de vue minéralogique les argiles formant ce sol sont constituées de 97.5% de montmorillonite et 2.5% de kaolinite. Les propriétés physiques et chimiques de ce sol sont résumées dans le tableau 1.

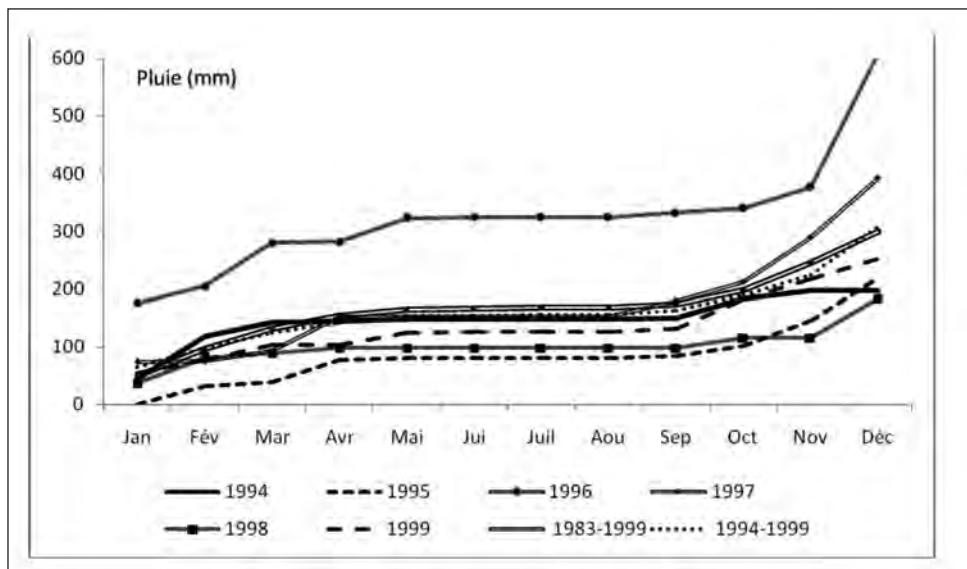
**Tableau 1.** Propriétés physiques et chimiques de la couche (0 - 20 cm) du sol de Sidi El Aydi en 1994

Paramètre	Unité	Valeur
Argile	%	51
Limon	%	28
Sable	%	21
CaCO <sub>3</sub>	%	15
C organique	%	1.4
pH-eau		8.2
CEC	meq/l	50
K	ppm	319
Na	ppm	154
Ca	ppm	8040
Mg	ppm	351
P	ppm	7

### Données climatiques

La moyenne des précipitations annuelles (Figure 1) est de 386 mm sur 31 ans, avec un maximum de 720 mm et un minimum de 128 mm. La moyenne des 19 dernières années n'est que de 296 mm avec une pluviométrie de 220 mm reçue en 1999 (année de mesures). Les précipitations se concentrent entre les mois d'octobre et avril, laissant ainsi une période sèche s'étalant sur presque 6 mois. Les mois les plus pluvieux sont décembre et janvier.





**Figure 1** : Cumules pluviométriques de la station de Sidi El Aydi durant les années d'expérimentation et moyennes pour la période 1983-1999.

### Dispositif expérimental

Installé en 1994 dans le but d'évaluer à long terme l'effet des systèmes de labour, des rotations céréalières et de la gestion des résidus sur la production du blé et sur la qualité du sol, le dispositif expérimental est un split-plot arrangé dans un bloc aléatoire incomplet avec trois répétitions. La rotation est représentée par les parcelles principales (12 x 20 m), avec trois niveaux Blé-Blé «BB», Jachère-Blé «JB» et Jachère- Blé-Orge «JBO». Chacune de ces parcelles est divisée en quatre sous parcelles (3 x 20 m), l'une labourée au pulvériser à disques (LC) et trois autres non labourées (semées directement) couvertes chacune d'un niveau de résidus de 0, 50 et 100% correspondant à 0, 1 et 6 t/ha, ( $NL_0$ ,  $NL_1$  et  $NL_6$ , respectivement) (Tableau 2).

**Tableau 2.** Description et désignation de la gestion des résidus

Travail du sol et Gestion des Résidus	Désignation
Non-Labour à 6 tonnes de résidus de cultures par hectare : correspondant à 100% de recouvrement surfacique au semis. En plus de ceux de la parcelle elle-même, d'autres résidus sont ajoutés et dispersés d'une façon homogène dans la parcelle.	NL <sub>6</sub>
Non-Labour à 1 tonne de résidus de culture par hectare : correspondant à 50% de recouvrement au semis du blé. Après la moisson, les résidus de récolte (en totalité) sont laissés tels quels dans la parcelle.	NL <sub>1</sub>
Non-Labour avec exportation totale de résidus de culture : correspondant à 0% de recouvrement surfacique au semis du blé.	NL <sub>0</sub>
Labour Conventionnel au pulvérisateur à disques à une profondeur de 10 à 15 cm, et incorporation, après moisson, de la totalité des résidus de culture dont le taux dépend des rendements, il varie de 1 à 3 tonnes /ha	LC

## Conduite de l'essai

### Travail du sol

Le travail du sol a été réalisé exclusivement au pulvérisateur à disques, qui permet une profondeur de labour de 10 à 15 cm. Le labour primaire d'été (après récolte du blé et de l'orge) consiste en un passage de cet instrument. Deux à trois autres passages (suivant l'humidité du sol) de cet instrument sont effectués pour préparer le lit de semences, lors du semis. La jachère de sol nu est entretenue mécaniquement.

Par contre, aucun travail de sol n'a été effectué dans les parcelles NL, et la seule opération aratoire consiste en une ouverture du sol par les outils du semoir direct pour permettre l'emplacement des graines et des engrais lors du semis. La jachère est dans ce cas entretenue par désherbage chimique.

### Gestion des résidus

Dans les parcelles LC, les résidus sont laissés en totalité, puis enfouis lors du labour d'été. Pour les parcelles NL, après moisson, les résidus sont laissés en surface pour NL<sub>1</sub>, ce taux est considéré comme un recouvrement de 50%, et déplacés des parcelles sans résidus (NL<sub>0</sub>) vers les parcelles NL<sub>6</sub> (100% de résidus), où ils seront dispersés d'une façon homogène, avant le semis des parcelles en blé (Tableau 2).

La masse surfacique correspondant à ces taux de résidus est la suivante (selon une équation développée par Mrabet (1997) :

- ✓ 0% de recouvrement surfacique correspond à 0 tonnes de résidus par hectare.
- ✓ 50% de recouvrement surfacique correspond à 1 tonne de résidus par hectare.
- ✓ 100% de recouvrement surfacique correspond à 6 tonnes de résidus par hectare.

### Semis

Le semis est réalisé avec un semoir commercial direct, à disque ouvreur simple, doubles disques semeurs, et des roues tasseuses. Ce semoir permet des espacements de 25 cm. Le blé (variété Achar ou Tilila) et l'orge (variété Aglou) sont semés au début du mois de novembre de chaque année à une dose de 120 et 100 kg/ha, respectivement.

### Fertilisation

La fertilisation (de fond) est appliquée aux parcelles semées en blé et en orge sous formes composées (19 : 38 : 00) à raison de 100 kg/ha au semis. Un apport d'engrais de couverture à base de sulfate d'ammoniaque (33%) est appliqué à raison de 100 kg/ha pour les parcelles semées en blé seulement. Les apports potassiques n'étaient pas nécessaires à cause de la richesse du sol en potassium. Ces taux d'application ont assuré des substances nutritives (N, P et K) non limitantes, puisque aucun symptôme de carence n'a été remarqué.

### Contrôle des mauvaises herbes et traitements phytosanitaires

Dans les parcelles NL, le désherbage, strictement chimique, est assuré par l'application de glyphosate (3 à 4 litres/ha) et le chlorosulfuron (10 g/ha), pour contrôler toute végétation adventice avant le semis du blé et orge. L'utilisation de ces herbicides a fourni un bon contrôle des mauvaises herbes pendant la croissance des cultures et dans la jachère. Dans les parcelles LC, le contrôle mécanique des adventices est réalisé au pulvérisateur à disques, au mois de mars, pour la jachère travaillée, et les parcelles NL sont traitées au chlorosulfuron (10 g/ha) pour éviter l'apparition des adventices au cours des cycles des deux cultures. En cas de densité importante des adventices, la jachère travaillée est aussi traitée chimiquement.

Carbofuran (insecticide / nematicide) est employé à 25 kg/ha, pour lutter contre les insectes, surtout la cécidomyie. Un traitement fongique préventif à base de Propiconazole est utilisé à une dose de 0.5 l/ha, pour lutter contre les maladies foliaires des céréales.

## Echantillonnage

L'échantillonnage du sol est effectué dans la jachère pour les rotations JB et JBO, et ceci pour éviter tous les problèmes liés à la gestion des résidus, mais en phase blé pour BB. Les prélèvements des échantillons de sol ont été effectués en juillet 1999 à l'aide d'une pelle pour l'horizon de surface 0-5 cm et d'une tarière pour les horizons 5-10 cm et 10-20 cm, après dégagement des résidus du mulch en surface. Deux prélèvements ont été effectués par parcelle JB et JBO et quatre prélèvements par parcelle BB. Les échantillons sont traités et analysés dans les laboratoires de l'INRA de Settat à raison de trois répétitions par traitement.

## Méthodes d'analyse

Le carbone organique a été déterminé par oxydation humide suivant la méthode de Walkley et Black décrite par Nelson et Sommers (1996). La méthode de Kjeldahl, décrite par Bremner et Mulvaney (1982), a été utilisée pour la détermination de l'azote total. La matière organique particulaire (MOP) a été évaluée par la méthode proposée par Cambardella et Elliott (1992), où la séparation de la fraction MOP consiste à un tamisage à 53  $\mu\text{m}$ , suite à une dispersion par une solution de 5% d'hexametaphosphate de sodium. La fraction supérieure à 53  $\mu\text{m}$  est ensuite analysée pour son contenu en carbone et en azote par les deux méthodes décrites auparavant. Le  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  a été mesuré par une électrode en verre pré-calibrée avec un rapport sol / eau de 1 : 2 (McLean, 1982) et en ajoutant KCl (10 g de sol : 20 ml d'eau + 3.8 g de KCl).

## Analyses statistiques

Les analyses statistiques consistent en une analyse de la variance pour évaluer l'effet du labour, de la rotation et des résidus sur les paramètres de la qualité du sol, et ce pour chaque profondeur. Le test de la plus petite différence significative (LSD à 5%) a été utilisé pour comparer les moyennes des différents traitements (Snedecor et Cochran, 1980).

## Résultats

Les résultats des tableaux 3 et 4 montrent qu'au bout de 5 années, le travail du sol, la gestion des résidus et la rotation avaient des effets plus ou moins significatifs sur le carbone et l'azote essentiellement près de la surface (0-5 cm). Cet effet diminuait avec la profondeur, tous traitements confondus.

**Tableau 3.** Carbone organique (Ct), azote total (Nt) et leur rapport sous différents travaux du sol, rotations et managements de résidus au bout de 5 ans

Horizon	0 - 5 cm			5 - 10 cm			10 - 20 cm		
	Ct	Nt	C/N	Ct	Nt	C/N	Ct	Nt	C/N
<i>Rotation</i>									
BB	1.80 A	0.13 B	14.2 A	1.58 A	0.10 A	11.8 A	1.48 A	0.13 A	12.2 A
JB	1.66 B	0.14 A	12.5 B	1.40 B	0.10 A	11.8 A	1.25 C	0.11 A	11.2 A
JBO	1.72 B	0.14 A	12.0 B	1.50 A	0.10 A	11.6 A	1.35 B	0.12 A	11.6 A
<i>Travail du sol &amp; Résidus</i>									
NL <sub>6</sub>	1.88 A	0.13 A	14.6 A	1.55 A	0.10 A	11.7 A	1.38 A	0.13 A	11.3 A
NL <sub>1</sub>	1.73 B	0.14 A	12.1 B	1.47 A	0.10 A	11.5 A	1.36 A	0.12 A	11.2 A
NL <sub>0</sub>	1.64 B	0.13 A	12.4 B	1.46 A	0.10 A	11.9 A	1.36 A	0.11 A	12.4 A
LC	1.66 B	0.14 A	12.4 B	1.49 A	0.10 A	11.8 A	1.35 A	0.12 A	11.6 A
<b>Moyenne</b>	<b>1.73</b>	<b>0.14</b>	<b>12.9</b>	<b>1.49</b>	<b>0.1</b>	<b>11.7</b>	<b>1.36</b>	<b>0.12</b>	<b>11.6</b>

Les valeurs suivies de la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes (LSD à 5%)  
Ct et Nt exprimés en g/100 g de sol.

### Carbone organique total (Ct) et azote total (Nt)

La comparaison des systèmes de labour NL<sub>1</sub> (1 tonne de résidus par hectare) et LC (1 à 3 tonnes par hectare enfouis) n'ont pas montré de différence significative concernant le carbone organique total (Ct) et l'azote total (Nt) (Tableaux 3).

L'addition de résidus sous NL<sub>6</sub> (6 tonnes par hectares) a augmenté le taux de Ct dans l'horizon 0-5 cm (1.88%) par rapport aux autres traitements, mais n'a pas enregistré de différence significative concernant Nt. L'absence de résidus sous NL<sub>0</sub> n'a pas enregistré de différence significative par rapport à LC ou NL<sub>1</sub>, concernant ces deux indicateurs.

En référence au Tableaux 3, la rotation avait un effet significatif sur Ct et Nt. En effet, la rotation BB était plus performante quant à l'enrichissement du sol en Ct pour les trois horizons 0-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm (1.80, 1.58 et 1.48%), alors que la rotation JB était la moins performante (1.66, 1.40 et 1.25%). Par contre, Nt a enregistré le taux le plus élevé sous JBO (0.144%), près de la surface (0-5 cm), suivie par la rotation JB (0.135%) et BB (0.130%). Pour les horizons 5-10 cm et 10-20 cm, aucune différence significative n'a été enregistrée entre les rotations en termes d'azote total.

### Carbone et azote de la matière organique particulaire (Cmop et Nmop)

Cmop et Nmop ont enregistré des différences plus significatives (Tableaux 4). En effet, dans l'horizon 0-5 cm, les taux de ces deux indicateurs étaient plus élevés sous NL<sub>1</sub> (0.92% et 0.073%) que sous LC (0.80% et 0.069%). Alors qu'au-delà de 5 cm, aucune différence significative n'a été enregistrée.

Sous NL<sub>6</sub> l'addition de résidus a augmenté significativement les taux de Cmop et Nmop, par rapport aux autres traitements, dans les trois horizons étudiés. La suppression de travail du sol sous NL<sub>0</sub> a diminué ces taux surtout près de la surface par rapport même à LC. Au-delà de 5 cm, les différences entre les traitements étaient négligeables.

La rotation BB a enregistré les valeurs les plus élevées dans les trois horizons étudiés pour Cmop (0.89, 0.83 et 0.73%) et Nmop (0.073, 0.068 et 0.061), alors que la rotation JB a enregistré des valeurs supérieures (pour 0-5 cm) ou égales à celles de JBO (pour 5-20 cm). La comparaison des résultats des tableaux 3 et 4 montre que Cmop et Nmop étaient plus sensibles aux différents traitements, que Ct et Nt.

**Tableau 4.** Carbone (Cmop) et azote (Nmop) de la matière organique particulaire et leur rapport sous différents travaux du sol, rotations et managements de résidus au bout de 5 ans.

Horizon	0 - 5			5 - 10			10 - 20		
	Cmop	Nmop	C/N-mop	Cmop	Nmop	C/N-mop	Cmop	Nmop	C/N-mop
Rotation									
BB	0.89 A	0.07 A	12.2 A	0.83 A	0.07 A	12.6 A	0.73 A	0.06 A	12.5 A
JB	0.86 A	0.07 A	11.9 A	0.65 B	0.06 B	11.6 A	0.44 B	0.04 B	10.6 B
JBO	0.84 A	0.07 A	12.8 A	0.69 B	0.06 B	12.3 A	0.48 B	0.04 B	11.3 B
Travail du sol & Résidus									
NL <sub>6</sub>	1.03 A	0.08 A	13.4 A	0.83 A	0.07 A	11.8 A	0.61 A	0.05 A	11.3 A
NL <sub>1</sub>	0.92 B	0.07 B	12.6 AB	0.71 B	0.06 B	13.1 A	0.55 B	0.05 A	12.0 A
NL <sub>0</sub>	0.72 C	0.06 C	11.3 B	0.66 B	0.06 B	12.0 A	0.55 B	0.05 A	11.0 A
LC	0.80 C	0.07 B	11.9 B	0.70 B	0.06 B	11.8 A	0.50 B	0.04 B	11.6 A
Moyenne	0.86	0.07	12.3	0.72	0.06	12.2	0.55	0.05	11.5

Les valeurs suivies de la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes (LSD à 5%)  
Cmop et Nmop exprimés en g/100 g de sol.

### Les rapports C/N et C/N particulaire (C/N-mop)

Le rapport C/N est un facteur déterminant pour la minéralisation de la matière organique et l'immobilisation de N dans le sol. Les résultats obtenus (Tableaux 3 et 4) montrent que les rapports C/N et C/N-mop n'enregistrent de différences significatives que dans l'horizon 0-5 cm. En effet, pour le rapport C/N, NL<sub>6</sub> a enregistré la valeur la plus élevée (14.6) par rapport aux autres traitements qui ne différaient pas entre eux (NL<sub>1</sub> (12.1), LC et NL<sub>0</sub> (12.4)), et le rapport C/N-mop, était aussi plus élevé sous NL<sub>6</sub> (13.4) que sous NL<sub>1</sub> (12.6), qui était lui-même plus élevé que sous LC (11.9) et NL<sub>0</sub> (11.3). En dessous de 5 cm aucune différence significative n'a été enregistrée.

La rotation avait un effet significatif sur C/N dans l'horizon 0-5 cm avec une valeur plus élevée sous BB (14.2) que sous JB (12.5) et JBO (12.0) qui ne différaient pas. Alors que l'effet de la rotation concernant C/N-mop a été enregistré dans l'horizon 10-20 cm, avec toujours la rotation BB qui a enregistré la valeur la plus élevée (12.5) par rapport à JB (10.6) et JBO (11.3) qui ne diffèrent pas significativement. Concernant le reste des horizons l'effet n'était pas significatif.

### pH<sub>KCl</sub> du sol

Le pH<sub>KCl</sub> compris entre 7.09 et 7.33 (Tableau 5) confirme la nature calcaire du sol étudié et les valeurs étaient plus basses en surface qu'en profondeur pour tous les traitements. L'effet du travail du sol sur pH<sub>KCl</sub> était significatif pour tous les horizons. En effet, NL avait baissé le pH du sol dans les trois horizons étudiés, et la différence trouvée, entre NL<sub>1</sub> et LC, était faible (0.05 unités), mais statistiquement significative.

**Tableaux 5.** pH<sub>KCl</sub> du sol sous différents travaux du sol, rotations et gestion des résidus au bout de 5 ans.

	Horizon (cm)		
	0 - 5	5 - 10	10 - 20
<i>Rotation</i>			
<b>BB</b>	7.09 C	7.13 C	7.15 C
<b>JB</b>	7.23 A	7.30 A	7.33 A
<b>JBO</b>	7.19 B	7.23 B	7.26 B
<i>Travail du sol &amp; Résidus</i>			
<b>NL<sub>6</sub></b>	7.16 B	7.20 B	7.22 B
<b>NL<sub>1</sub></b>	7.13 C	7.19 C	7.22 B
<b>NL<sub>0</sub></b>	7.20 A	7.24 A	7.25 A
<b>LC</b>	7.18 AB	7.23 AB	7.28 A
<b>Moyenne</b>	<b>7.17</b>	<b>7.22</b>	<b>7.24</b>

Les valeurs suivies de la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes (LSD à 5%)

L'exportation de résidus de NL<sub>0</sub> a engendré une augmentation de pH (7.20), tandis que l'addition de résidus n'a causé qu'une légère hausse de pH (7.16), mais qui restait toujours inférieure au pH sous LC. Le même effet persistait en profondeur mais à un degré plus faible. Dans les horizons 5-10 et 10-20 cm, NL<sub>6</sub> et NL<sub>1</sub> présentent des pH similaires mais plus faibles que NL<sub>0</sub> et LC qui ne diffèrent pas significativement les uns des autres.

## Discussion

### Effet du travail du sol

Au bout de 5 années d'expérimentation, on note une amélioration du niveau du carbone et d'azote sous NL<sub>1</sub> par rapport à LC. Cette différence est exprimée par les moyennes qui sont en général plus élevées sous NL<sub>1</sub> concernant le carbone et l'azote totaux et confirmée par les taux significativement élevés de C<sub>mop</sub> et N<sub>mop</sub> essentiellement près de la surface (0-5 cm).

Mrabet *et al.* (2001a), dans une expérience de 11 ans, ont montré que le niveau de Ct était plus important sous NL que sous LC jusqu'à une profondeur de 7 cm, NL a permis la séquestration de 3.6 Mg/ha de plus que LC dans l'horizon 0-20 cm. Dans d'autres expériences, les contenus du sol en Ct et Nt sous NL ont augmenté dans l'horizon 0-2.5 cm, au bout de 3 années, alors que ces augmentations se sont étendues à 7.5 cm après 5 années (Testa *et al.*, 1992 in Bayer *et al.*, 2000) et à 12.5 cm après 9 ans (Pavinato, 1993 in Bayer *et al.*, 2000) puis à 17.5 cm après 11 ans (Burlé *et al.*, 1997). En effet, la réduction du carbone organique sous LC, est probablement due à l'érosion et à l'oxydation biologique des matières organiques. Harvin *et al.* (1990) et Reicosky *et al.* (1995) ont montré que ces processus étaient accélérés par le labour, par contre, ils sont contrôlés ou ralentis par NL, qui favorise la rétention de la MO dans le sol (Lal, 1997).

Les résultats montrent aussi que les horizons 5-10 et 10-20 cm ne perdent pas de leurs teneurs en Ct et Nt, ainsi qu'en C<sub>mop</sub> et N<sub>mop</sub> sous NL. Il n'y a donc pas déperdition en profondeur mais une tendance vers une séquestration de ces éléments en surface. Toutefois, Six *et al.* (1998) ont trouvé que le carbone se stratifie en surface et se perd en profondeur par rapport au LC.

Le rapport C/N est un facteur déterminant pour la minéralisation de la MO et l'immobilisation de N dans le sol. Les résultats obtenus indiquent la seule différence significative entre NL<sub>1</sub> et LC enregistrée concerne l'indicateur C/N-mop qui est plus élevé dans l'horizon 0-5 cm alors que pour C/N aucune différence significative n'est enregistrée. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Balesdent (1997) qui a remarqué que le rapport C/N de la couche de surface s'accroît en raison de l'augmentation de MOP. L'utilisation de traçage isotopique montre que ce changement du C/N résulte de l'accumulation accrue de carbone récent sous NL.

Dick (1983) a rapporté que C/N est plus élevé sous NL que sous LC dans la tranche 0-30 cm. Le même résultat a été trouvé par Mrabet *et al.* (2001a) dans l'horizon 0-2.5 cm. Dans les sols calcaires une baisse de pH peut être bénéfique pour le sol et les cultures. Les résultats



trouvés montrent une baisse de  $\text{pH}_{\text{KCL}}$  sous NL par rapport à LC de 0.05 unités. Mrabet *et al.* (2001a) ont trouvé une différence de 0.2 unités  $\text{pH}_{\text{eau}}$  dans l'horizon 0-2.5 cm au bout de 11 ans. Cette baisse de pH est très importante pour les sols calcaires du Maroc en termes de disponibilité nutritive pour la récolte, particulièrement en N et P. Karlen *et al.* (1994) ont noté une différence de 0.4 unités de  $\text{pH}_{\text{eau}}$  entre NL et LC. Laryea et Unger (1995) et Grant et Bailey (1994) n'ont, cependant, pas trouvé d'effet des systèmes de labour sur le pH du sol.

## 4.2. Effet des résidus

La gestion des résidus est déterminante quant à la réussite du système non-labour. Il y a une relation positive entre le niveau de C incorporé au sol à partir des résidus et la quantité de C dans le sol (Rasmussen et Collins, 1991). En effet, l'addition de résidus sous  $\text{NL}_6$ , a augmenté le niveau de Ct par rapport au  $\text{NL}_1$ , alors que l'absence de résidus sous  $\text{NL}_0$  a eu tendance à baisser ce niveau (en dessous même de celui de LC) dans l'horizon (0-5 cm). En profondeur, la différence n'est plus significative, mais la même tendance est notée jusqu'à 10 cm. Par contre, l'indice  $\text{C}_{\text{mop}}$  enregistre des différences significatives pour les trois horizons. L'addition des résidus a augmenté significativement le niveau de  $\text{C}_{\text{mop}}$  dans l'ensemble du profil (0-20 cm), alors que leur exportation a baissé significativement ce taux juste dans l'horizon 0-5 cm.

L'exportation totale des résidus sous  $\text{NL}_0$  a négativement affecté le taux de  $\text{C}_{\text{mop}}$  par rapport à l'incorporation des résidus au pulvérisateur à disque, et ceci jusqu'à une profondeur de 10 cm (profondeur de labour), en dessous de laquelle  $\text{NL}_0$ , enregistre un niveau de  $\text{C}_{\text{mop}}$  plus élevé.

La figure 2 montre la corrélation positive qui existe entre les taux de résidus surfaciques et le taux de Ct enregistré sous NL. Les pentes des courbes de régression sont plus importantes pour le niveau 0-5 cm que pour les autres horizons, ce qui explique une certaine stratification de la matière organique sous NL. La figure 3 montre la même corrélation positive concernant cette fois le taux de résidus et les niveaux de  $\text{C}_{\text{mop}}$  enregistrés sous NL, avec, cependant, des pentes des courbes de régression plus importantes que pour Ct. Ceci confirme les résultats signalés auparavant avec des différences plus significatives concernant  $\text{C}_{\text{mop}}$ , autrement dit la sensibilité de  $\text{C}_{\text{mop}}$  comme indicateur du statut de la MO dans le sol par rapport à Ct.

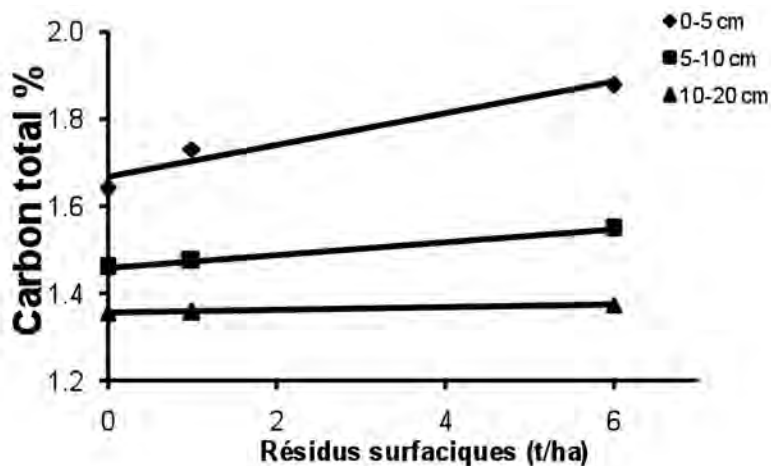


Figure 2 : Variation du carbone organique total en fonction du taux de résidus surfaciques sous non labour (Ct exprimé en g/100 g de sol).

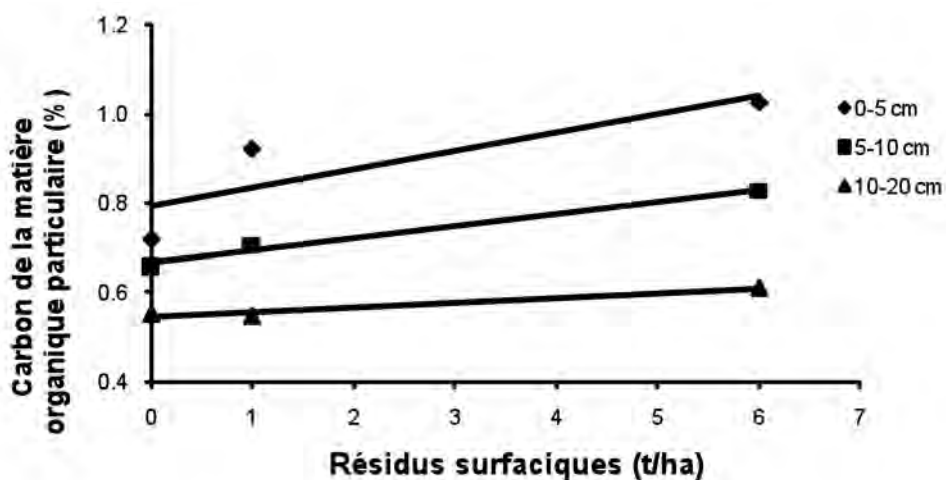
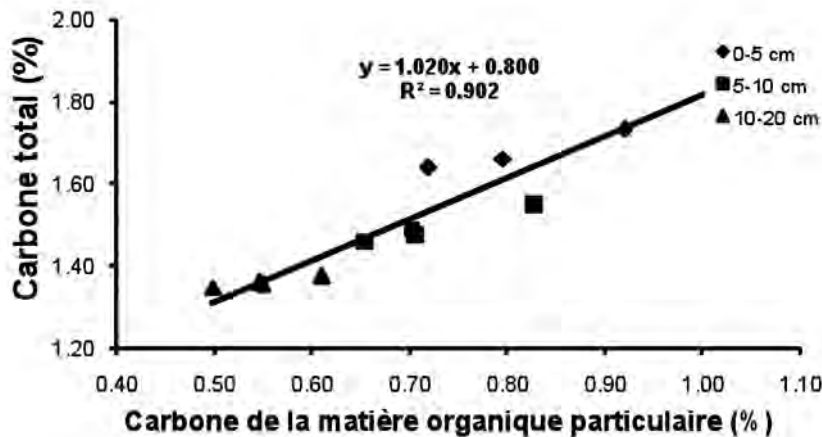


Figure 3 : Variation du carbone de la matière organique particulaire en fonction du taux de résidus surfaciques sous non labour (Cmop exprimé en g/100 g de sol).

D'un autre côté la variation de Ct dépend étroitement de celle de Cmop (Figure 4), celle ci expliquant 90% de la variance du Ct avec une pente de la droite de régression non différente de 1.



**Figure 4** : Variation du carbone total en fonction du taux de carbone particulaire dans l'horizon 0-20 cm (*Ct* et *Cmop* exprimés en g/100 g de sol).

La gestion des résidus n'a pas eu d'effet significatif sur l'indicateur Nt, dû probablement au dégagement de N sous forme  $N_2O$  sous NL (Unger, 1994). Concernant Nmop, les différences sont plus significatives, et l'addition des résidus augmente le niveau de cet indicateur le long du profil 0-20 cm, alors que l'exportation totale des résidus le baisse du moins dans l'horizon 0-5 cm.

L'addition des résidus a augmenté les rapports C/N et C/Nmop dans la couche 0-5 cm, donc a permis de stocker plus de C que de N, mais leur exportation n'a d'effet sur C/Nmop que dans l'horizon (0-5 cm), ce qui explique encore une fois la sensibilité de MOP à la gestion du sol.  $NL_0$  a enregistré la valeur la plus faible du rapport C/Nmop. Ceci montre que l'exportation des résidus comme leur incorporation affecte qualitativement la MO.

L'addition de résidus ou leur suppression augmente le  $pH_{KCl}$  par rapport au  $NL_1$ . En effet  $NL_6$  a permis d'augmenter le pH jusqu'à 10 cm de profondeur, alors que l'exportation des résidus augmente le niveau de cet indicateur encore plus, au delà même de celui enregistré sous LC.

L'addition des résidus sous semis direct a permis une amélioration sensible des contenus de la surface du sol en Ct, Nt, Cmop et Nmop. Par contre, l'exportation totale des résidus sous NL a négativement affecté ces paramètres qui sont même à des niveaux inférieurs à ceux trouvés sous LC. Autrement dit, la réussite du NL dépend du taux de résidus laissé en surface, et l'incorporation des résidus et des chaumes par le labour est une alternative plus conservatrice du sol que l'exportation des chaumes (par pâturage ou autre). Cependant, l'effet de la gestion des résidus sur ces indicateurs, n'a pas dépassé les cinq premiers centimètres au bout de cinq années de NL.

### **Effet de la rotation**

Les niveaux Ct et C<sub>mop</sub> les plus importants sont enregistrés sous la rotation BB et les plus bas sous la rotation JB, alors que la diminution de la jachère dans la rotation triennale JBO a permis une amélioration intermédiaire de ces deux indicateurs.

Les rotations JBO améliorent le niveau de N<sub>t</sub> près de la surface (0-5 cm), par rapport ) à BB. En profondeur, c'est la rotation BB qui tend à améliorer plus le niveau de cet indicateur.

La rotation BB améliore le niveau de N<sub>mop</sub> dans les trois horizons, alors que les rotations JB et JBO enregistrent les mêmes valeurs.

Les rapports C/N et C/N<sub>mop</sub>, sont plus élevés sous la rotation BB. Mais ces différences n'étaient significatives qu'en surface pour C/N, et dans l'horizon (10-20 cm) pour C/N<sub>mop</sub>.

L'indicateur pH<sub>KCl</sub> a été très sensible à la rotation, et les différences enregistrées sont très significatives pour les trois horizons étudiés. La rotation BB a permis la baisse la plus importante du pH<sub>KCl</sub> alors que les plus hautes valeurs ont été enregistrées sous JB.

En général, la rotation BB est la plus favorable à l'amélioration des indicateurs du statut organique du sol. En effet, elle a permis d'augmenter la matière organique et l'azote dans le sol, et une baisse de pH, alors que la rotation JB a enregistré les valeurs les moins intéressantes pour les indicateurs étudiés. Cette performance de la rotation BB a été confirmée par Mrabet *et al.* (2001b). Ces résultats sont en accord avec ceux de Wood *et al.* (1991) qui ont recommandé la réduction de la jachère dans la rotation pour améliorer le contenu en matière organique du sol.

D'un autre côté, la nécessité d'introduire la jachère dans la rotation pour améliorer et stabiliser les rendements et permettre une réduction du déficit hydrique d'une part, et répondre aux contraintes des besoins alimentaires pour nourrir les animaux dans les exploitations d'autre part (Bouzza, 1990), impose l'adoption de la rotation JBO, qui tout en répondant aux contraintes des aléas climatiques et des besoins économiques des agriculteurs, permet une importante amélioration du statut organique du sol (Mrabet, 2008).

### **Conclusions et recommandations**

L'estimation des indicateurs du statut organique du sol a montré que le non labour est une stratégie de gestion prometteuse dans le semi-aride marocain pour améliorer la qualité du sol, à long terme. En effet, au bout de 5 années d'expérimentation, le non-labour a permis une séquestration du carbone et d'azote plus importante par rapport au labour conventionnel, essentiellement près de la surface du sol (0-5 cm).

Sous non labour, le taux de matière organique séquestré est corrélé positivement au taux de résidus surfacique. En effet, l'addition de ces résidus a permis d'améliorer davantage les niveaux de C, N, C<sub>mop</sub> et N<sub>mop</sub> sous NL, alors que l'exportation totale des résidus

de récolte baisse les niveaux de ces indicateurs, en dessous même des niveaux enregistrés sous labour conventionnel. D'un autre côté, l'amélioration du carbone organique total est due essentiellement à celle du carbone organique particulaire dans le sol.

Les rapports C/N et C/N-mop sont relativement constants dans le sol, mais sont influencés par le taux de résidus surfacique sous NL. Les valeurs élevées sous NL près de la surface indiquent que le sol a conservé plus de carbone que d'azote et la correction de ces rapports exige un apport azoté supplémentaire pour activer la minéralisation de la matière organique. Le non-labour a permis une très faible baisse de pH dans le sol, mais qui est très significative dans tout le profil 0-20 cm.

Cinq années ont été suffisantes pour permettre l'amélioration du statut organique du sol sous non-labour essentiellement dans l'horizon de semis (0-5 cm), alors que dans d'autres expérimentations de plus longue durée, cette amélioration a concerné des profondeurs plus importantes, ce qui permet de conclure que ces améliorations se propagent depuis la surface en fonction du temps.

Les indicateurs liés à la matière organique particulaire (Cmop, Nmop et C/Nmop) et le pH, sont plus sensibles aux différents traitements et sont par conséquent de bons indicateurs de la qualité du sol à moyen terme.

La rotation blé continu permet l'amélioration des indicateurs de la qualité du sol, alors que l'introduction de la jachère dans le système jachère-blé baisse considérablement cette amélioration. La réduction de la jachère dans la rotation triennale jachère-blé-orge permet une amélioration intermédiaire de ces indicateurs mais répond mieux aux besoins des exploitations dans ces régions.

Les résultats trouvés n'expliquent qu'en partie les changements occasionnés par le non-labour et la gestion des résidus des cultures. Il faut pouvoir réaliser d'autres études et recherches dans les mêmes conditions expérimentales pour pouvoir cerner tous les paramètres.

## Références bibliographiques

**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.

**Balesdent, J.** 1997. Un point sur les matières organiques des sols. Numéro spécial «Le sol, un patrimoine à préserver» Chambre d'agriculture, supplément n° 856: 17-22.

**Bayer, C., Martin-Neto, L., Mielniczuk, J. and Ceretta, C.A.** 2000. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil Till. Res.* 53: 95-104.

**Bouzza, A.** 1990. Water conservation in wheat rotations under several management and tillage systems in semiarid areas. PhD. Dissertation, University of Nebraska, Lincoln, NE USA 200p.

**Bremner, J.M. and Mulvaney, C.S.** 1982. Nitrogen-total. in: Page A.L., Mille, R.H., and Keeney D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2 Agronomy 9*, 2<sup>nd</sup> Edition Soil Sci. Soc. Am., Madison WI, 595-624.

**Burle, M.L., Mielniczuk, J. and Focchi, S.** 1997. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. *Plant Soil* 190: 309-316.

**Cambardella, C.A. and Elliott, E.T.** 1992. Particulate soil organic matter changes across a grass land cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.

**Campbell, C.A. and Janzen, H.H.** 1995. Effect of tillage on soil organic matter in Farming for a better environment. *Soil Water Conservation Soc. Ankeny IA USA*, 9-11.

**Cavanagh, P.P., Koppi, A.J. and Mc Bratney, A.B.** 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. Soil Res.* 29: 263-270.

**Chriyaa, A., Moor, K.J. and Waller, S.S.** 1996. Browse foliage and annual legume pods as supplements to wheat straw for sheep. *An. Feed Sci. Tech.* 62: 85-96.

**Cooper, P.J.M., Gregory, P.J., Tully, D. and Harris, H.C.** 1987. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North-Africa. *Experimental Agriculture* 23:113-158.

**Dick, W. A.** 1983. Organic carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 102-107.

**Doran, J.W.** 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 44: 765-771.

**Doran, J.W., and Parkin, T.B.** 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran *et al.* (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*, Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 35, Madison WI, 3-21.

- El Brahli, A. et Mrabet, R.** 2000. La jachère chimique pour relancer la céréaliculture non-irriguée en milieu semi-aride marocain. Journée nationale sur le désherbage des céréales, Settat, Maroc. Pp : 133–145.
- Elliott, E.T.** 1986. Aggregate structure, carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 627–633.
- Grant, C.A. and Bailey, L.D.** 1994. The effects of tillage systems and KCl addition on pH, conductance,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , P, K, and Cl distribution in the soil profile. *Can. J. Soil Sci.* 74:307–314.
- Gregorich, E.G. and Carter, M.R.** 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. *Developments in Soil Science* 25, Elsevier, NY USA.
- Harvin, J.L., Kissel, D.E., Maddux, L.D., Claassen, M.M. and Long, J.H.** 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1515–1519.
- Kacemi, M.** 1992. Water conservation, crop rotation and tillage systems in semi-arid Morocco. PhD Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO. 200p.
- Kacemi, M., Peterson, G.A. and Mrabet, R.** 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.
- Karlen, D.L., Wollenhaupt, N.C., Erbach, D.C., Berry, E.C., Swan, J.B., Eash, N.S. and Jordahl, J.L.** 1994. Long-term tillage effects on soil quality. *Soil Till. Res.* 32: 313–327.
- Lal, R.** 1997. Soil processes and greenhouse effect. In: Lal *et al.* (eds), *Methods for assessment of soil degradation*, *Advances in Soil Science*, CRC Press. NY, Vol : 199-212.
- 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*. International Board for Soil Research and Management, IBSRAM Proceedings 12 (2). Bangkok, Thailand
- Laryea, K.B. and Unger, P.W.** 1995. Grassland converted to cropland: soil conditions and sorghum yield. *Soil Till. Res.* 33: 29–45.
- Lopez-Bellido, L.** 1992. Mediterranean cropping systems. In: Pearson, C.J. (ed.), *Field crop ecosystems. Ecosystems of the World* 18, Elsevier, Amsterdam, 311–356.
- McLean, E.O.** 1982. Soil pH and lime requirements. In: *Methods of soil analysis. Part 2 Chemical and microbiological properties*, 2<sup>nd</sup> edition. Page A.L. et al. (eds.), *Agronomy Monograph* 9 American Society of Agronomy, Madison WI, 199–244.
- Mrabet, R.** 1997. Crop residue management and tillage systems for water conservation in a semiarid area of Morocco. PhD. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO. USA 220p.
- Mrabet, R. and Bouzza, A.** 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 August 2000, Hamburg, Germany.

**Mrabet, R., Saber, N., El-Brahli, A., Lahlou, S., and Bessam, F.** 2001a. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Soil Till. Res.* 57: 225 – 235.

**Mrabet, R., Ibno Namr, K., Bessam, F. and Saber, N.** 2001b. Soil chemical quality changes organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Land Degrad. Develop.* 12: 505–517.

**Mrabet, R.** 2008. No-Tillage systems for sustainable dryland agriculture in Morocco. INRA Publication. Fanigraph Edition. 153p.

**Nelson, D.W. and Sommers, L.E.** 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In Page A. L. (ed.) *Methods of analysis part 2. Chemical and microbial properties.* 2<sup>nd</sup> Ed. Agronomy Monograph series 9: 539 -579.

**Radford, B.J., Key, A.J., Robertson, L.N. and Thomas G.A.** 1995. Conservation tillage increases soil water storage, soil animal populations, grain yield and response to fertilizer in the semiarid tropics. *Aust. J. Exp. Agric.* 35: 223–232.

**Rasmussen, P.E. and Collins, H.P.** 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semi-arid regions. *Adv. Agron.* 45: 93–134.

**Reicosky, D.C., Kemper, W.D., Langdale, G.W., Douglas, JR C.L. and Rasmussen, P.E.** 1995. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Conserv.* 50 : 253-261.

**Six, J., Elliot, E.T., Paustian, K. and Doran, J.W.** 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1367–1377.

**Snedecor, G.W., and Cochran W.G.** 1980. *Statistical Methods.* 7<sup>th</sup> edition. Iowa State University Press, Ames, IA.

**Tisdall, J.M. and Oades, J.M.** 1982. Organic matter and water stable aggregates. *J. Soil Sci.* 33: 141–164.

**Unger, P. W.** 1994. *Managing agricultural residues.* Lewis Pub., Boca Raton, FL USA.

**Wood, C.W., Westfall, D.G. and Peterson, G.A.** 1991. Soil carbon and nitrogen changes on initiation of no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 470–476.