

Impacts de l'Agriculture de Conservation sur les Propriétés et la Productivité des Vertisols du Maroc Central



ir. Rachid MOUSSADEK

2012

Promoteur

Prof. Dr. Eric Van Ranst

Co-promoteur

Dr. ir. Rachid Mrabet

**Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur (PhD)
en Sciences: Sciences de la Terre**

**Proefschrift voorgedragen tot het bekomen van de graad van Doctor in de
Wetenschappen: Geologie**



Impacts de l'Agriculture de Conservation sur les Propriétés et la Productivité des Vertisols du Maroc Central



ir. Rachid MOUSSADEK

2012

Promoteur

Prof. Dr. Eric Van Ranst

Co-promoteur

Dr. ir. Rachid Mrabet

**Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur (PhD)
en Sciences: Sciences de la Terre**

**Proefschrift voorgedragen tot het bekomen van de graad van Doctor in de
Wetenschappen: Geologie**

**Impacts de l'Agriculture de Conservation
sur les propriétés et la productivité
des Vertisols du Maroc Central**

**Impact van duurzame landbouw
op de eigenschappen en de productiviteit
van Vertisols in Centraal- Marokko**



ir. Rachid MOUSSADEK

2012

Membres du Jury

Prof. Dr. Jacques Verniers (Président)
Dépt. Géologie et Science du Sol (UGent)

Prof. Dr. Eric Van Ranst (Promoteur)
Dépt. Géologie et Science du Sol (UGent)

Dr. ir. Rachid Mrabet (Co-promoteur)
Division Scientifique (INRA-Rabat)

Prof. Dr. Peter Finke
Dépt. de Géologie et Science du Sol (UGent)

Prof. Dr. ir. Ann Verdoodt
Dépt. de Gestion des Sols (UGent)

Prof. Dr. Geert Baert
Laboratoire de Nutrition Végétale (Hogeschool Gent)

Prof. Dr. ir. Wim Cornelis
Dépt. de Gestion des Sols (UGent)

Dr. Yves Le Bissonnais
UMR INRA - IRD - SupAgro Montpellier

Photo de la page de garde : Vertisol (Tirs) de la région de Zaer (Maroc Central) cultivé en lentille et céréale sous Semis Direct.

Title of thesis: Impact of Conservation Agriculture on properties and productivity of Vertisols in Central Morocco.



Ce travail a été financé en partie par la Coopération Technique Belge CTB-BTC



Une bourse a été octroyée du VLIR-UOS (university cooperation for development) pour finaliser cette thèse.



Le projet INRM (Integrated Natural Resources Management) a financé une partie des travaux de terrain réalisés dans ce travail

Written at
Departement of Geology and Soil Science
Ghent University
Krijgslaan 281/S8
B-9000 Ghent, Belgium

():114

"My god, increase me in knowledge", Taha-114

Remerciement

Ce travail est signé de mon nom mais il est le fruit de diverses collaborations. En premier lieu, mes sentiments de profonde gratitude s'adressent à mon promoteur, Prof. Dr. Eric Van Ranst. Sa confiance, sa disponibilité, son enthousiasme et ses conseils ont permis l'achèvement de cette thèse. Ce travail est marqué de son empreinte : j'en retire un profond respect, une grande fierté et les mots me manquent pour exprimer à la juste mesure son engagement.

Je tiens à remercier de tout cœur mon co-promoteur, Dr. Rachid Mrabet de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Il s'est investi avec beaucoup d'abnégation et de sollicitude dans l'encadrement et le déroulement de cette étude. La profondeur et la valeur constructive de ses remarques et suggestions dépassent toute estimation.

Ce travail n'aurait pas vu le jour sans l'appui scientifique et moral du Prof. Mohamed Badraoui, Directeur de l'INRA. Je souhaite exprimer ma profonde gratitude pour son soutien et ses encouragements depuis le début et tout le long de cette étude.

Je remercie très vivement la Coopération Technique Belge (C.T.B.) et le VLIR-UOS pour le soutien financier sans lequel cette étude ne serait pas réalisée.

Je remercie vivement Dr. Rachid Dahan et Dr. Mohamed El Mourid, responsables du Projet INRM "Integrated Natural Resource Management" entre 'International Center for Agricultural Research in the Dry Areas' (ICARDA) et l'INRA. Ils m'ont permis d'entreprendre mes activités de recherche doctorale en s'appuyant sur leur confiance, encouragement et conseil.

J'ai aussi beaucoup de plaisir à remercier l'équipe du Programme de Recherche Agronomique pour le Développement (PRAD) sur la dégradation des sols au Maroc, notamment ceux de Laboratoire d'étude des Interactions Sol -Agro système - Hydro système (LISAH) à Montpellier et Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II à Rabat (IAV HII) pour leur appui scientifique à la réalisation d'une partie de cette thèse.

Les données expérimentales acquises pour la réalisation de cette thèse sont l'aboutissement du travail de plusieurs personnes. Avant tout, j'exprime toute ma sympathie aux membres de l'équipe du Laboratoire de Science du sol du Département de Géologie et Science du Sol de la Faculté des Sciences de l'Université de Gand et aux membres de l'Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles du Centre Régional de la Recherche Agronomique de Rabat. Qu'ils trouvent ici ma profonde reconnaissance pour leur soutien et encouragement.

Je tiens à adresser tous mes remerciements aux membres du jury. Je remercie tout d'abord le Prof. Dr. Jacques Verniers de l'Université de Gand pour avoir accepté de présider le jury de thèse ; Prof. Dr. Peter Finke, Prof. Dr. ir. Ann Verdoodt, Prof. Dr. ir. Wim Cornelis de l'Université de Gand, Prof. Dr. Geert Baert du 'Hogeschool' de Gand et Dr. Yves Le Bissonnais de LISAH de Montpellier pour avoir accepté de juger ce travail.

Ma reconnaissance envers ma femme, mes deux enfants (Nour arafa & Bahae eddine) et toute ma famille est inestimable pour tous les sacrifices et privations auxquels ils ont été soumis pendant mes absences récurrentes lors de cette thèse.

Finalement, je remercie tous mes collègues et amis pour leurs conseils et encouragements.

*Rachid Moussadek,
Mai 2012*

Table des matières

Remerciement	i
Table des matières	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Liste des abréviations	xi
Résumé.....	xiii
Summary	xvi
Introduction générale	1
 Chapitre 1. Agriculture de conservation dans les zones arides du Maroc	 6
Conservation agriculture in dry areas of Morocco	7
1.1. Introduction	8
1.1.1. Sustainable agricultural intensification in Morocco.....	8
1.1.2. Climate and soils of Morocco	9
1.2. Conservation agriculture: the evolving paradigms	10
1.2.1. Principles of conservation agriculture.....	10
1.2.2. Machinery developments in no-till farming.....	11
1.2.3. Defying the weed challenge	12
1.2.4. Crop residues and livestock integration	13
1.3. Achievable no-tillage (NT) impacts on crops and cropping systems.....	14
1.4. Changes in soil physical and environmental quality under NT	17
1.4.1. Scarce water storage and conservation	17
1.4.2. Soil structure and aggregation	18
1.4.3. Soil erosion and water infiltration.....	19
1.4.4. Soil bulk density, pore size distribution and compaction	20
1.5. No-tillage impacts on soil chemical quality and carbon sequestration	20
1.5.1. Carbon emission abatements with no-tillage systems	20
1.5.2. No-tillage as a prime strategy for carbon sequestration	22
1.5.3. Exchangeable cations, pH and cation exchange capacity	23
1.6. Conclusions.....	25
1.7. References	26
 Chapitre 2. Caractérisation des Vertisols du Maroc (Tirs).....	 35
2.1. Introduction	36
2.2. Distribution et propriétés des Vertisols	37
2.2.1. Caractéristiques et classification des Vertisols	37
2.2.2. Distribution dans le monde	37

2.2.3. Distribution en Afrique	39
2.3. Vertisols du Maroc: classification et typologie	40
2.3.1. Classification des Vertisols	42
2.3.2. Typologie des Tirs	47
2.4. Distribution des Tirs au Maroc	65
2.5. Facteurs de formation des Tirs	68
2.5.1. Climat.....	68
2.5.2. Végétation	70
2.5.3. Relief	70
2.5.4. Roches-mères	71
2.5.5. Eaux superficielles	71
2.5.6. Eaux souterraines	72
2.5.7. Age du sol	72
2.5.8. Action anthropogène.....	73
2.5.9. Les relations spatio-temporelles avec d'autres sols	74
2.6. Gestion des Tirs	75
2.6.1. Contraintes des propriétés physiques.....	75
2.6.2. Contraintes liées aux éléments nutritifs	75
2.7. Conclusion	76
2.8. Références	77
 Chapitre 3. Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen	83
3.1. Introduction.....	85
3.2. Matériels et méthodes	87
3.2.1. Description du site.....	87
3.2.2. Les mesures de sol effectuées.....	89
3.2.3. Analyse statistique des données	92
3.3. Résultats et discussions	92
3.3.1. Ruissellement et pertes en terre.....	92
3.3.2. Stabilité des agrégats, matière organique et densité apparente.....	96
3.3.3. Relation entre les propriétés physiques et les coefficients de ruissellement ..	99
3.4. Conclusions.....	101
3.5. Références	103
 Chapitre 4. Effet du labour et la gestion des résidus sur les propriétés hydrodynamiques et mécaniques d'un Vertisol Méditerranéen	107
Influence of tillage and residues management on soil hydrodynamic and mechanical properties of a Mediterranean Vertisol	108
4.1. Introduction.....	109
4.2. Materials and methods	111
4.2.1. Location, climate and soil	111

The study was initiated in the fall of 2004. It is intended to be continued for a long period of time in order to study short as well as long-term influences of tillage systems on soil quality and crop productivity.	112
4.2.2. Experiment layout and treatments	112
4.2.3. Measurements.....	113
4.2.4. Statistical analysis.....	117
4.3. Results and discussion	117
4.3.1. Soil bulk density and moisture	117
4.3.2. Soil strength.....	119
4.3.3. Hydraulic conductivity	121
4.3.4. Sorptivity.....	122
4.3.5. Soil water potential dynamics	122
4.4. Conclusions.....	125
4.5. References	126
Chapitre 5. Impact du semis direct sur le stockage et qualité de la matière organique des sols du Maroc Central	133
Impact of no-tillage on soil organic matter storage and quality in soils of Central Morocco	134
5.1. Introduction.....	135
5.2. Material and methods	136
5.2.1. Research sites, experimental set-up and crop management.....	136
5.2.2. Experimental set-up	137
5.2.3. Soil sampling and analysis	137
5.3. Results and discussion	140
5.3.1. Soil organic carbon content (SOCc)	140
5.3.2. Soil organic carbon storage (SOCs).....	140
5.3.3. Humic substances	144
5.4. Conclusions.....	145
5.5. References	146
Chapitre 6. Impact des pratiques du labour sur le flux du dioxyde du carbone durant différents saisons dans un Vertisol Méditerranéen	152
Effect of tillage practices on the soil carbon dioxide flux during different seasons in a Mediterranean Vertisol.....	153
6.1. Introduction.....	154
6.2. Materials and methods	155
6.2.1. Physiographic setting.....	155
6.2.2. Experiment layout and treatments	156
6.2.3. Soil CO ₂ measurement.....	157
6.2.4. Soil water content and soil temperature	157
6.2.5. Soil strength.....	158

6.2.6. Statistical analysis.....	158
6.3. Results and discussion	158
6.3.1. Soil CO ₂ emission in fall tillage	158
6.3.2. Soil CO ₂ emission in spring tillage	160
6.3.3. Effect of soil temperature and moisture content on the soil CO ₂ flux.....	161
6.3.4. Soil strength.....	162
6.3.5. Cumulative CO ₂ emission during fall and spring tillage	164
6.4. Conclusions.....	166
6.5. References	167
Chapitre 7. Effet de la variabilité climatique et le travail du sol sur le rendement des cultures sous un Vertisol Méditerranéen.....	169
7.1. Introduction	171
7.2. Matériels et méthodes	173
7.2.1. Description des sites.....	173
7.2.2. Echantillonnage et mesures	175
7.2.3. Analyse statistique.....	176
7.3. Résultats et discussion.....	176
7.3.1. Conditions climatiques	176
7.3.2. Rendement du blé	178
7.3.3. Rendement de la lentille	181
7.3.4. Relation rendement-pluie	183
7.4. Conclusions.....	184
7.5. Références	185
Conclusions générales	189
Annexes.....	194

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tab.1.1. Regional assessment of wheat yield (Mg ha^{-1}) under no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) systems in dry areas of Morocco.....	14
Tab.1.2. Valuing water from rainfall with no-tillage fallow (Bouzza, 1990).....	18
Tab.1.3. Effects of tillage systems on soil surface aggregation in two cereal regions of Morocco.....	19
Tab.1.4. Energy, time and power use by different tillage systems in Morocco (El Gharras et al., 2004).	21
Tab.1.5. Impact of tillage system on soil organic carbon ($\text{g}/100\text{g}$) in surface horizon	23
Tab.1.6. Impact of tillage system on soil organic carbon and nitrogen (Mg ha^{-1})	23
Tab.1.7. Soil extractable-P, exchangeable K and pH under no- and conventional tillage applied for 11 years (Mrabet et al., 2001b).	24
Tab.1.8. Influence of tillage system on cation exchange capacity (CEC) and exchangeable cations ($\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) at the seed zone (0-50 mm) of the Sidi El Aydi soil (Chaouia, Morocco) (Mrabet, 2008).	24

Chapitre 2

Tab.2.1. Les noms attribués au Vertisols ou aux sols à caractère vertique	39
Tab.2.2. La distribution des Vertisols en Afrique	40
Tab.2.3. Données analytiques de quelques profils types des Tirs au Maroc	50
Tab.2.4. Caractéristiques physico-chimiques de Vertisols au Portugal	51
Tab.2.5. Caractéristiques physico-chimiques d'un Vertisol en Espagne	52
Tab.2.6. Caractéristiques physico-chimiques d'un Vertisol en France	52
Tab.2.7. Caractéristiques physico-chimiques de Vertisols en USA	53
Tab.2.8. Caractéristiques physico-chimiques de Vertisols en Afrique	55
Tab.2.9. Coloration de profils de Vertisols	57
Tab.2.10. Répartition des Tirs en fonction du climat et de la topographie	70

Chapitre 3

Tab.3.1. Caractéristiques du sol à l'installation de l'expérimentation en 2004.....	88
Tab.3.2. Paramètres de ruissellement et d'érosion mesurés lors de la simulation de pluie selon le mode du travail du sol.....	95
Tab.3.3. Effet des trois pratiques culturales sur les propriétés du sol.....	98
Tab.3.4. Relation entre les propriétés physiques du sol et le ruissellement	100

Chapitre 4

Tab.4.1 . Selected soil properties at the start of the experiment (2004).....	112
Tab.4.2. Bulk density (D_b) measured at selected date during wheat mid-growing seasons in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50)	117

Tab.4.3. Volumetric water content (Θ) measured at selected date during wheat mid-growing seasons in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50).....	118
---	-----

Tab.4.4. Hydraulic conductivity (K) and Sorptivity (S) of the soil surface measured at different pressure heads (h) on selected dates during wheat mid-growing seasons in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50, respectively)	121
---	-----

Chapitre 5

Tab.5.1. Selected soils characteristics at the different sites (Merchouch, Morocco).....	138
--	-----

Tab.5.2. Soil organic carbon storage (SOCs) (Mg.ha^{-1}) in three sites under no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) in Merchouch, Morocco.	142
--	-----

Chapitre 6

Tab.6.1. Selected soil properties at the start of the experiment	155
--	-----

Tab.6.2. Pearson's correlation coefficients between soil CO_2 flux and soil water content and soil temperature during fall and spring tillage	161
--	-----

Tab.6.3. Pearson's correlation coefficients between soil CO_2 flux and soil cone index per depth during fall and spring tillage.....	164
---	-----

Chapitre 7

Tab.7.1. Caractéristiques du sol à l'installation de l'expérimentation en 2004.....	174
---	-----

Tab.7.2. Pluies moyennes mensuelles reçues entre 2004-2011 et 1970-2011	177
---	-----

Tab.7.3. Paramètre d'analyse de la variance des rendements (grains et biomasse) des cultures blé et lentille en fonction des années (2004-2011) et du type du travail du sol (SD et SC).....	178
--	-----

Tab.7.4. Les coefficients de régression entre les rendements (grains et biomasse) des cultures (blé et lentille) et le total de pluie reçu durant la période de croissance (PCR), la période végétative (PVG) et la période de maturité (PRM) en semis direct (SD) et en semis conventionnel (SC).....	183
--	-----

Liste des figures

Chapitre 1

Fig.1.1. Impact of tillage system on infiltration process in Sidi El Aydi clay soil. Conventional tillage = off-set disking (Mrabet, 2008).....	20
---	----

Chapitre 2

Fig.2.1. Les horizons d'un profil type du Vertisol (Dudal & Eswaran, 1988)	64
Fig.2.2. Carte de la répartition des Tirs au Maroc	66
Fig.2.3. Quelques profils de Vertisols (Tirs) à travers les régions du Maroc (Gharb (a), Zaer (b), Chaouia (c) et Tadla (d))	69
Fig.2.4. La relation spatiale du Vertisol avec les autres types des sols (Deckers et al., 2001)	74

Chapitre 3

Fig.3.1. Moyennes mensuelles interannuelles des précipitations et des températures à la station de Merchouch comparées aux valeurs mensuelles de l'année 2009-2010.....	87
Fig.3.2. Effet de deux intensités de pluie sur le ruissellement cumulé sous semis avec travail conventionnel (SC), semis direct sans résidus de culture (SD0) et sous semis direct avec 50% des résidus retournés à la surface du sol (SD50).	94
Fig.3.3. Effet des modes du travail du sol (semis avec travail conventionnel (SC), semis direct sans résidus de culture (SD0) et sous semis direct avec 50% des résidus retournés à la surface du sol (SD50)) sur le diamètre moyen pondéral (DMP).....	96

Chapitre 4

Fig.4.1. Long-term monthly average temperature, rainfall (1970-2011) and monthly average rainfall during experimental seasons (2008-2009 and 2010-2011) in the study area	111
Fig.4.2. Soil strength, measured on March 10, 2009, in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50, respectively)	119
Fig.4.3. Soil strength, measured on April 15, 2011, in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50, respectively)	120
Fig.4.4. . Soil water potential ψ measured at 20 cm depth in conventional tillage (CT), no-tillage without residues (NT0) and tillage with 50% residues cover (NT50), during wheat mid-growing seasons a) in 2009 and b) in 2011.....	124

Chapitre 5

Fig.5.1. Monthly average of rainfall and temperature (2010-2011) at Merchouch compared to monthly values of a long-term period (1970-2011).	139
Fig.5.2. Soil organic carbon content (SOCc) and bulk density (D_b) in three soil types after 5 years under NT and CT.....	141
Fig.5.3. Humic substances in Vertisol under NT and CT; (FA: Fulvic Acid; HA: Humic Acid; HU: Humin); for each of the substances.	144

Chapitre 6

Fig.6.1. Long-term average and 2009-2010 cropping season values of rainfall and temperature at the Merchouch research station.	156
Fig.6.2. Soil CO ₂ flux associated with fall tillage treatments	159
Fig.6.3. Soil CO ₂ flux associated with spring tillage treatments	160
Fig.6.4. Topsoil (0-5 cm) water content (SWC) under different tillage treatments and mean soil (0-5 cm) and air temperature before and after tillage during the fall (a) and spring (b).	162
Fig.6.5. Soil strength (C.I) measured 1 hour after tillage under different treatments, during fall and spring period. At each depth	163
Fig.6.6. Cumulative CO ₂ flux during the first 96h following fall and spring tillage operations.....	165

Chapitre 7

Fig. 7.1. Variation mensuelle de la température mensuelle moyenne, maximale et minimale dans la région d'étude (2004-2011)	173
Fig. 7.2. Effet du travail du sol sur le rendement grain du blé en fonction du total de pluie reçu lors de la saison agricole (Novembre-Mai).....	179
Fig. 7.3 . Effet du travail du sol sur la biomasse du blé en fonction du total de pluie reçu lors de la saison agricole (Novembre-Mai).....	180
Fig. 7.4. . Effet du travail du sol sur le rendement grain de la lentille en fonction du total de pluie reçu lors de la saison agricole (Novembre-Mai).....	181
Fig. 7.5. Effet du travail du sol sur la biomasse de la lentille en fonction du total de pluie reçu lors de la saison agricole (Novembre-Mai).....	182

Liste des abréviations

C.I.:	‘Cone index’ pour mesurer la résistance du sol par le pénétromètre (en MPa)
Conc1:	Concentrations en sédiment en eau ruisselé durant 1 ^{ère} pluie (en g l ⁻¹)
Conc2:	Concentrations en sédiment en eau ruisselé durant 2 ^{ème} pluie (en g l ⁻¹)
CO₂ flux:	Flux d’émission de CO ₂ du sol (en g m ⁻² h ⁻¹)
Da ou Db:	Densité apparente du sol (en Mg m ⁻³)
Df:	Degré de liberté
DMP:	Diamètre moyen pondéral (en mm)
Ecart (PCR):	Ecart entre le total de pluie en (PCR) par année et le moyen du total de pluie en (PCR)
Ero1:	Perte en sol durant 1 ^{ère} pluie (en g m ⁻²)
Ero2:	Perte en sol durant 2 ^{ème} pluie (en g m ⁻²)
h:	Potentiel matriciel de l’eau du sol (en kPa)
HA:	Acide humique
FA:	Acide fulvique
HU:	Humine
K(ψ):	Conductivité hydraulique à la pression ψ (en mm h ⁻¹)
Ke1:	Coefficient d’écoulement durant 1 ^{ère} pluie (en %)
Ke2:	Coefficient d’écoulement durant 2 ^{ème} pluie (en %)
Lin1:	Lame infiltrée durant 1 ^{ère} pluie (en mm)
Lin2:	Lame infiltrée durant 2 ^{ème} pluie (en mm)
LR1:	Lame ruisselée durant 1 ^{ère} pluie (en mm)
LR2:	Lame ruisselée durant 2 ^{ème} pluie (en mm)
MO ou SOM:	Matière organique du sol (en g kg ⁻¹)
PVG:	Période végétative (de Novembre à Février)
PRM:	Période de maturité (de Mars à Mai)
PCR:	Période de croissance de la culture (de Novembre à Juin)
RT:	Labour réduit
S:	Sorptivité (en mm h ^{-1/2})
SAU:	Surface agricole utile
SC ou CT:	Semis avec travail conventionnel
SD ou NT:	Semis direct
SD50 ou NT50:	Semis direct avec 50% du mulch

SD0 ou NT0:	Semis direct avec 0% du mulch
SOCc:	Teneur du sol en carbone organique (en g kg ⁻¹)
SOCs:	Stock du sol en carbone organique pour une profondeur déterminée (en Mg.ha ⁻¹)
SWC ou θ:	Teneur en eau volumétrique du sol (en m ³ m ⁻³)
T:	Température (en °C)

Au Maroc, la pression démographique a accentué l'utilisation intensive des terres agricoles, entraînant une détérioration rapide de la qualité des sols et la réduction de leurs productivités. Pour faire face à cette situation alarmante, l'agriculture de conservation (AC) constitue une alternative prometteuse pour produire plus et de manière durable sur des sols fragilisés tels que les Vertisols (ou Tirs) qui font partie des sols surexploités au pays vu leur fort potentiel de production malgré leur grande susceptibilité à la compaction et à l'érosion hydrique quand ils subissent des opérations de labour requérantes. En effet, les Tirs ont des caractéristiques intrinsèques particulières qui posent des problèmes quant à leur mise en valeur agricole de manière intensive sous des événements liés au changement climatique (sécheresse ou inondation) qui sont devenus plus fréquents durant les dernières décades au Maroc.

Cette recherche a été entreprise dans le but de contribuer à améliorer les connaissances sur le comportement des Tirs sous AC, comme mode d'adaptation au changement climatique dans un environnement Méditerranéen. Elle a été orientée essentiellement vers l'étude de l'impact du AC ou du semis direct (SD), avec ou sans résidus, sur les propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques des Tirs, sur leurs érodibilités et sur leurs productions agricoles.

En effet, suite l'utilisation d'un simulateur de pluie sur des Tirs, sous SD depuis 2004, on a montré l'importance du maintien d'environ 50% de résidus à la surface du sol pour réduire jusqu'à 70% du taux de ruissellement et plus de 50% des pertes en terres par rapport au semis conventionnel (SC).

Certes une densité apparente plus élevée au niveau des horizons de surface a été observée sous SD vis-à-vis SC, ce qui a réduit l'infiltration et la sorptivité dans les Tirs non labourés. Cependant la teneur en eau était souvent supérieure sinon égale sous SD par rapport au SC. Ceci a été expliqué par une meilleure stabilité des agrégats ainsi que la présence du mulch favorisant une meilleure rétention d'eau du sol sous SD par rapport au SC. En plus, le suivi du potentiel matriciel du sol durant le cycle de croissance du blé, a démontré que la présence de 50% mulch en surface a permis aux traitements sous SD de se dessécher tardivement (3 semaines) après le dessèchement d'un sol sous SC.

Par ailleurs, cette recherche a permis de rapporter que l'adoption du SD est capable de renverser l'appauvrissement des sols en matières organiques (MO) et que le degré de cet enrichissement en MO dépend de la texture des sols. En effet, une augmentation de 8 % à 10 % du stock de la MO, dans SD par rapport au SC sur une profondeur de (0-30cm), a été observée dans les sols à texture argileuse (Vertisols et Cambisols). Cependant, pour les sols à texture moins fine de la zone d'étude (Luvisols), aucune différence significative n'a été observée dans le stock de MO entre les deux traitements (SD et SC) après 5 années d'expérimentation.

Quant à l'analyse de la qualité chimique de cette MO, on a montré que les Tirs non labourés ont significativement plus de substances humiques de formes stables (acides humiques et humine) que de formes instables (acides fulviques), contrairement au Tirs labourés.

Ce travail de recherche nous a permis de confirmer, par des mesures in situ et à différentes saisons, que l'émission de CO₂ du sol vers l'atmosphère est significativement plus faible sous SD que sous SC dans les Tirs Méditerranéens.

Sachant que n'importe quel système de gestion des sols ne peut être adopté par les agriculteurs s'il n'améliore pas la production, une grande partie de cette recherche a été consacrée au suivi des rendements de cultures (blé et lentille) sous SD et SC. Suite à l'analyse de 7 années de mesures, on a pu conclure qu'en plus que le système SD permet un rendement de la culture du blé meilleur sinon égal par rapport au SC. Par contre, la culture de la lentille a été plus vulnérable à l'excès de pluie et sa biomasse a été réduite lors des années pluvieuses sous SD comparativement au SC. Ceci a remis en cause le choix de cette culture comme rotation avec le blé durant les années humides sur les Vertisols non labourés.

Finalement, on peut conclure que le SD, avec une bonne gestion des résidus de cultures, constitue est une solution sérieuse pour réduire la vulnérabilité des filières céréalières aux variations climatiques qui marque la zone d'étude et pour produire de manière durable sur les Vertisols sous climat méditerranéen contrasté.

Summary

In Morocco, intensive agriculture with deep tillage and soil inversion caused rapid soil structure deterioration with loss of soil organic matter content. This practice leads to a decrease in soil fertility, a degradation of the soil physical properties and a reduction of crop yields in different soil types, such as Vertisols.

In fact, Vertisols (or Tirs as vernacular name) are among the most productive soils in Morocco, but they are also susceptible to compaction and reduced water infiltration due to intensive tillage.

No-tillage (NT) is commonly promoted as a management practice capable of offsetting soil carbon depletion, improving aggregation, enriching the soil nutrient pool and enhancing crop productivity in many parts of the world. However, the influence of the NT system as compared to the conventional tillage (CT) system on physical, chemical and hydrodynamic soil properties was not yet well studied in the semi-arid environment of Morocco where rainfall ranges from 350 to 600 mm.

This research focused mainly on those parameters with important agronomical or environmental impact: bulk density (D_b), soil strength assessed using cone index (CI), hydraulic conductivity (K), sorptivity (S), soil water potential (SWP), soil organic carbon content or stock (SOCc or SOC_s), runoff, soil loss, soil CO₂ emission and crop yield.

In fact, a long-term no-tillage trial was established in October 2004, in the semiarid Zaer Plain of Central Morocco, in order to evaluate the impact of different tillage practices (NT, CT) with or without crop residue cover on the Vertisol properties.

The results showed that D_b was lower in CT compared to NT treatments. The hydraulic conductivity (K) near saturation, measured using disk infiltrometer, were higher or equal in

CT compared to NT50 (NT with 50% of residues cover) but always higher than NT0 (NT without residues). However, sorptivity (S) was always higher in CT than in both NT treatments. This is probably due to soil compaction measured using a penetrometer which was found to be higher in NT than in CT treatments. Nevertheless, higher aggregate stability was found under NT compared to CT, which could explain the greater soil water content in soil with no-tillage.

Using a rainfall simulator, it was observed that runoff rates were 3 to 4 times lower under NT50 compared to NT0 and CT. Also, a reduction of 50% was reported in soil losses with NT50 compared to CT. Therefore, it seems very important not to remove residues in Vertisols after harvesting if NT is practiced, in order to favor the beneficial effect on soil water storage and reducing water erosion.

Concerning soil organic carbon (SOC), our results showed that the SOC stock (SOCs) measured in soils with clay texture (Vertisols, Cambisols) was significantly higher in NT than in CT. No significant difference in SOC_s was observed in soils with coarse texture (Luvisols). In Vertisols, the quantity of stable humic substances (humic acid and humin) was significantly higher in NT compared to CT. In Contrast, the instable fulvic acid fraction was lower in NT than in CT.

This research demonstrated that soil disturbance increases CO₂ flux immediately after tillage of Vertisols and the soil CO₂ emission under NT was significantly lower than under CT. These findings promote the use of no-tillage practices to reduce CO₂ losses in this semiarid region, to mitigate green house gas emissions and consequently to reduce the negative impact of climate change. Also, wheat yield under NT was higher or equal to yield under CT during the experimental period (7 years). However, lentil yield under NT

was lower than under CT during humid years. This result shows that wheat-lentil is not adapted as rotation system on Vertisols during rainy seasons.

Finally, we can conclude that NT is a promising alternative to reduce the vulnerability of the cereal yields to climate variations and to sustain productivity on semiarid Mediterranean Vertisols.

Introduction générale

Le secteur agricole joue un rôle important dans la croissance de l'économie marocaine et constitue un appui fort au développement du pays puisqu'il représente jusqu'à 20 % du produit intérieur brute et emploie environ 40% de la population active (Akesbi, 2006). Actuellement, la surface agricole utile (SAU) au Maroc représente environ 9,2 millions d'hectares dont 65% est emblavée en céréaliculture cependant cette superficie doit être réduite de 22% tout en augmentant sa production de 44% à l'horizon 2020 dans le cadre de la nouvelle stratégie agricole (Plan Maroc Vert) ((Badraoui & Dahan, 2010). Ceci pose un double défi à ce secteur: assurer une sécurité alimentaire pour une population à croissance démographique accélérée et amortir la dégradation des sols agricoles dont 90 % se situent dans la zone semi-aride et aride (Mrabet et al., 2011).

En effet, l'agriculteur marocain, pour faire face à des insuffisances techniques, économiques et foncières, s'oriente vers une exploitation maximale du sol. Ainsi, après des décades d'utilisation des terres, le sol se trouve dépourvu de matière organique et présente une structure dégradée facilement transportable. De même, l'élevage extensif basé sur le pâturage des chaumes, les travaux du sol tardifs d'automne ou précoces d'été, le faible recyclage des résidus de récolte ont induit des pertes énormes du patrimoine sol. Ceci a été confirmé par la FAO qui a réalisé un inventaire exhaustif sur l'ensemble des terres du pays et elle avait estimé que sur l'ensemble des sols en zones agricoles et parcours du Maroc, 9 millions d'hectares sont dégradés (Ouassou et al., 2006). En plus, les milieux arides et semi-arides marocains reçoivent de moins en moins d'eau de pluies en raison des changements climatiques planétaires (Driouech et al., 2010). En d'autres termes, le déclin du potentiel de productivité des ressources en terres est le résultat d'une dégradation

accélérée du sol qui réduit sa fertilité, ce qui déstabilise l'écosystème. Cet état de lieu a remis en cause le mode d'exploitation des sols au Maroc.

En effet, le labour excessif de ces sols, qui résulte d'abord d'une logique du profit à court terme, ne fait que compromettre les besoins des générations futures. Il est donc judicieux de revoir ces techniques culturales en cherchant des systèmes de gestion agricoles qui permettent une agriculture durable et techniquement acceptable, augmentant et stabilisant les rendements tout en préservant les ressources en sols.

De ce fait, les agronomes et les chercheurs à travers le monde ont proposé des alternatives aux techniques conventionnelles du travail du sol et plusieurs stratégies agricoles, basées sur la réduction du labour, la rotation appropriée et la gestion des résidus des cultures, ont été envisagées et sont connues comme étant les systèmes de labour de conservation ou l'agriculture de conservation (AC). Ce système, encore peu adopté au Maroc, pourrait offrir des solutions aux problèmes que connaît son agriculture, surtout dans les zones marquées par la présence de sols dégradés et sous l'influence des changements climatiques.

Parmi ces sols fragilisés et érodables, les Vertisols, ou les Tirs, selon leur nom vernaculaire, sont parmi les sols les plus exploités au pays vu leur fort potentiel de production. La plupart des Tirs du Maroc se trouvent dans les étages bioclimatiques semi-arides et subhumides et ils sont souvent utilisés pour la production céréalière ou pour les cultures industrielles. Certes les Tirs sont très appréciés par les agriculteurs grâce à leur productivité mais leurs propriétés intrinsèques, les rendent difficile à aménager. En effet, les Tirs présentent des caractéristiques physiques, hydrodynamiques et minéralogiques particulières qui posent des problèmes quant à leur mise en valeur agricole sous les

événements climatiques extrêmes (sécheresse ou inondation) et qui sont devenus récurrents durant les dernières décades.

Pour palier à la vulnérabilité des Tirs aux effets négatifs des changements climatiques et améliorer leurs qualités et leurs productivités, l'AC constitue une opportunité qui a déjà fait ses preuves dans plusieurs régions du Monde (Syers et al., 2001). Au Maroc, plusieurs travaux ont porté sur l'effet de l'AC sur les Tirs en milieu aride et semi-aride (< 350 mm) et ils ont montré qu'AC augmente le rendement du blé par rapport au travail du sol conventionnel (Mrabet, 2008). Cette augmentation du rendement est due à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau et de la qualité du sol. Cependant aucune étude n'a eu lieu sur les Tirs du milieu moins aride, mais à forte variabilité climatique du Maroc Central (pluie moyenne annuelle varie de 350 à 600 mm) pour expliquer quantitativement les effets du AC sur les propriétés hydrodynamiques, les paramètres d'érosion, le stock du carbone organique du sol, l'émission du CO_2 et enfin sur la production agricole des Tirs.

Cette recherche a été entreprise dans le but de contribuer à améliorer les connaissances sur le comportement des Tirs sous AC, comme mode d'adaptation au changement climatique en milieux fragiles et érodés. Elle a été orientée essentiellement vers l'étude de l'effet du AC ou semis direct, avec ou sans résidus de culture, sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des Tirs et sur leurs productions agricoles.

Ainsi, cette thèse s'organise autour de sept chapitres. Les deux premiers chapitres correspondent à une analyse bibliographique. Le premier chapitre présente un état de lieu sur les acquis de l'agriculture de conservation en milieu aride Marocain. Le deuxième chapitre résume les caractéristiques des Tirs du Maroc, analyse leurs similitudes par rapport aux Vertisols du monde et discute leurs potentialités et contraintes d'aménagement.

Le chapitre 3 s'intéresse à l'effet du non labour et les résidus de cultures, par rapport au labour conventionnel, sur les paramètres d'érosion des Tirs.

Le chapitre 4 se centre sur l'effet du semis direct sur les propriétés hydrodynamiques des Tirs notamment la conductivité hydraulique et la sorptivité.

Le chapitre 5 a pour objectif de mieux comprendre l'effet du semis direct et du semis conventionnel sur le stock du carbone organique des Tirs en comparaison avec d'autres types de sols de la région.

Quant au chapitre 6, il montre des mesures 'in situ' du flux de CO₂ du sol, durant deux saisons différents, sous semis direct et différents modes conventionnels de labour sur les Tirs méditerranéens.

Le dernier chapitre analyse l'effet de la variabilité climatique (durant les 7 dernières années) et le mode de travail du sol (semis direct et semis conventionnel) sur le rendement des cultures (blé-lentille) sous Tirs.

La thèse s'achève par des conclusions générales qui exposent les apports de ce travail, ses limites, sa place dans le cadre de la recherche agronomique pour l'évaluation de nouveaux systèmes de culture avec des mesures de conservation. Des perspectives de recherche pour l'étude du semis direct dans les Vertisols en climat méditerranéen sont aussi proposées.

Références

- Akesbi, N. 2006. Evolution et perspectives de l'agriculture marocaine. In Rapport 50 ans du développement humain et perspectives 2025. 85-198. Casablanca: Editions Maghrébines.
- Badraoui, M. & Dahan, R., 2010. The Green Morocco Plan in relation to food security and climate change, in. Solh, M., Saxena, M.C. (Eds.), Proceedings of International Conference on Food Security and Climate Change in the Dry Areas, 1-4 February 2010, Amman, Jordan, ICARDA Publication. 61-70.
- Driouech, F., Déqué, M. & Sánchez-Gómez, E. 2010. Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Glob. Planet Change*. 72, 1-10.
- Mrabet, R., 2008. No-tillage systems for sustainable dry land agriculture in Morocco. INRA Publication. Rabat.
- Mrabet R., Moussadek R. , Fadlaoui A. & Van Ranst E. 2012. Conservation agriculture in dry areas of Morocco. *Field Crops Research*. 132, 84-94.
- Ouassou, A., Amziane, T. & Lajouad, L. 2006. State of natural resources degradation in Morocco and plan of action for desertification and drought control. *In Desertification in the Mediterranean Region*. In Kepner, W. G. Rubio, J. L. Mouat, D. A. & Pedrazzini, F. A. (Eds.). Security Issue. Dordrecht, Netherlands. Springer. 253p.
- Syers, J. K., Craswell, E. T. & Nyamudeza, P., 2001. Research needs and opportunities for farming Vertisols sustainability. *In Syers, J. K., Penningde Vries, F. T., Nyamudeza, P. (Eds.). The Sustainable Management of Vertisols*. CAB International Publishing, 283-290.

Chapitre 1. Agriculture de conservation dans les zones arides du Maroc

Ce chapitre est adapté à partir d'un article publié et sous référencé comme suit.

Mrabet, R., Moussadek, R., Fadlaoui, A. & Van Ranst, E. 2012. **Conservation agriculture in dry areas of Morocco**. Field Crops Research. 132, 84-94.

Conservation agriculture in dry areas of Morocco

Abstract

Moroccan agriculture is characterized by the co-existence of both modern and smallholder traditional agriculture. Both types of agriculture are under degradative processes due to misuse of tillage implements, mismanagement of crop residues and inappropriate links between grain and livestock productions. From the research conducted over the last three decades, the vast majority of beneficial tillage effects are transient. Conversely, the harmful effects of conventional tillage (CT) systems are long-lasting, if not permanent. The present paper aims at evaluating major achievements in conservation or no-tillage agriculture (CA or NT) research conducted under dry climate. Conservation agriculture seems to be a more sustainable alternative than conventional agriculture in arid areas of Morocco. Nonetheless, we have found from the literature analysis some constraints for its extension in semiarid and humid Vertisols (rainfall > 300 mm) mainly due to lack of information about the effect of NT on those soils, noted for its poor physical and structural properties, which makes them vulnerable to water erosion and compaction under heavy machinery use. Consequently, further research in these aspects is needed to accurately judge the effect of NT (vis-à-vis CT) under areas with high climate variability.

Key Words: Conservation agriculture; no-tillage; dry areas

1.1. Introduction

1.1.1. Sustainable agricultural intensification in Morocco

Morocco's total area is 71.08 million hectares (M ha), including 9.2 M ha of cultivated land (13%), 5.8 M ha of forest (8%) and 24 M ha of rangeland (30%). The agricultural sector generates 13 to 20% of the gross domestic product (GDP) depending on harvest and 20 % of the total export value of the country. It provides employment to near 44% of the work force.

Cereal production is the most significant agricultural resource. Wheat and barley are, and have been the most commonly grown dry land cereals and are of paramount importance in the national economy (Chebbi & El Mourid, 2005). Food legumes (i.e. fababean, chickpea and lentil), maize and oilseed crops represent important components of the cropping systems. Perennials include olive, almond, fig, pistachio and fodder trees.

Dry land farming systems integrate crop and livestock production. Livestock accounts for 26 to 32% of the Agricultural GDP. It is dominated by sheep, with 16.3 M heads, 5.1 M goats, and 2.7 M heads of cattle (Boulanouar & Benlekhal, 2006). Due to its extensive nature, livestock production mainly relies upon grazing on communal lands, fallows and stubble (Ben Salem & Smith, 2008).

In a period of 50 years, cereal area increased from 4.5 to 5.3 M ha contributing to a 3.2-fold increase in cereal production (from 25 M quintals in 1961-65 to more than 80 M quintals in 2008-2010); however crop yields are still low and stagnant even after adoption of fertilizers and appropriate crop cultivars.

The use of tillage implements like disks and hoes is intrinsic to Moroccan agriculture and extension services are still advertising it. Tillage research, which was initiated in 1970s,

was mainly directed towards deep tillage combined with refining seedbeds. Moldboard plow as a primary tillage is still used for tilling depths down to 30-35 cm, followed by different hoe and disk harrow implements for seedbed preparation. On these traditional systems and previous to tillage operations, crop residues are removed, grazed or even burned. Off-set disks for both primary and secondary tillage operations are most common in large areas (53-61 % of cultivated cereals). Chiseling and surface tillage with small hoe cultivators are now more common than 40 years ago and encouraged by extension services. This misuse of tillage systems associated with over-grazing have induced alarming rates of soil organic matter decline, erosion and desertification (Dimanche, 1997).

Facing all these paradigms, the major objective brought by the newly launched Green Morocco Plan is sustainable production intensification for all types of farms and crops. The plan focuses on agricultural systems that are productive and remunerative which at the same time conserve and enhance the natural resource base and environment, and positively contribute to harnessing the environmental services. Among pertinent strategies of this plan is decreased cereal cultivated area by 22% while increasing cereal production by 44% at the 2020 horizon (Badraoui & Dahan, 2010). This plan recognizes the potential of no-tillage systems to intensify crop production systems through sustainable precipitation use.

1.1.2. Climate and soils of Morocco

Morocco is situated at the southern edge of the mid-latitude storm track. The country is lying within the influence zone of the Atlantic, the Mediterranean and the Sahara, together with very steep mountains. It is characterized by a diverse but generally dry uncertain climate. Its mean features are low mean annual precipitation, high inter- and intra-annual rainfall variability and high rates of potential evapotranspiration (Chbouki et al., 1995). Most of the country is arid (90%) with aridity tending to increase with distance from the

North. About 95 to 98% of yearly rainfall is concentrated from October to April and this coincides with cereal production cycle. Precipitation is inversely related to the concurrent state of the North Atlantic Oscillation (Knippertz et al., 2003).

Owing to the high degree of aridity and variability of rainfall in most of the country, agriculture is particularly vulnerable to drought. Prolonged droughts were reported in 1979-84; 1994-95; 1998-99 (Balaghi et al., 2006) and recently in 2006-07. Consequently, the agricultural sector is highly sensitive to climate change and subjected to recurrent droughts (Dai et al., 2004; Esper et al., 2007). Touchan et al. (2011) projected more frequent and intense drought-like conditions. Another feature of rainfall is its high intensity, which produces flash-flood conditions.

The general aridity, in conjunction with factors related to topography, is also responsible for the widespread occurrence of soils with poor or no profile development (Regosols), calcareous soils (Calcisols) and dark cracking clays (Vertisols). These latter soils have poor physical and structural properties and are low in organic matter, which makes them vulnerable to water erosion and compaction under heavy machinery use (Ryan et al., 2006).

1.2. Conservation agriculture: the evolving paradigms

1.2.1. Principles of conservation agriculture

Conservation agriculture (CA) is an approach to managing agro-ecosystems for improved and sustained productivity, increased profits and food security while preserving and enhancing the resource base and the environment (FAO, 2002). Dumanski et al. (2006) described CA as the integration of natural resources management with sustainable and economic agricultural production, providing beneficial ecosystem services such as (1) food

and fiber and biofuels, and (2) less erosion, less pollution, clean water, fresh air, healthy soil, natural fertility, C sequestration, sustainability and higher production.

Parr et al. (1990) defined no-tillage (NT) system as a specialized type of CA consisting of one-pass planting and fertilizer operations during which the soil and surface residues are minimally disturbed. NT systems eliminate soil manipulation except at the time of combined seeding and fertilizer placement. Other terms used to describe this system include zero-tillage, slot-tillage and direct seeding systems. The NT systems are composed of three dependent components: direct seeding without previous tillage operations or seedbed preparation; crop residue maintenance at or near the soil surface; and weed control mainly with herbicide application or with crop rotations. In this review, the term “no-tillage agriculture” is interchangeably used to replace the name “conservation agriculture” and to shift the focus away from the concept towards the system of soil management.

1.2.2. Machinery developments in no-till farming

Execution of no-tillage requires expensive machinery, mainly special drills, mulch traders and sprayers. Hence, the major constraint to adoption of NT systems in Morocco is the lack of planting equipments (El Gharras & Idrissi, 2006).

Research on NT systems was carried out using imported no-till disk drills (Bouzza, 1990; Kacemi, 1992; Mrabet, 1997). Dry seeding and deep placement of N and P fertilizers to promote plant vigor and root growth were the major drivers for developing appropriate local no-till drills for crops in Morocco (Bahri & Bansal, 1992; Dahane, 1992; Nousfi, 1993; Bahri et al., 1993).

Dry early seeding is important for guaranteeing crops maximum use of rainfall and early cover for better protection against intense rainfall and cold. Early seeding is also a

prerequisite for high and stable yields due to earlier crop growth associated with the avoidance of late droughts and hot winds.

For fine textured soils, Bourarach et al. (1998) and El Gharas et al. (2004) recommended hoe type no-till drills for dry seeding winter cereals and several food legumes. However, no-till drills for row crops are not yet available and further research is needed for their development. For small scale farmers in mountainous areas, many animal-drawn planters are available in the market. These designs should be allowed for research and extension purposes in Morocco.

1.2.3. Defying the weed challenge

Under conventional agriculture, herbicide use in dry areas of Morocco is still low (not exceeding 20% of cereal lands). Most weeds are considered forage for livestock. On the contrary, lack of tillage means rigorous use of herbicides in first years of NT adoption. Weed development is an important challenge under NT practices but does not pose insoluble problems (Avci et al., 2007). According to El-Brahli and Mrabet (2001), abandoning the plow induced a qualitative and quantitative change in the flora. Among important changes, there is an increase of specific annual (i.e. *Bromus*) and perennial weeds. Kacemi (1992) related decline in crop performances under NT to the use of inappropriate pre-seeding herbicides in controlling weeds. Nevertheless, El-Brahli and Mrabet (2001) were able to guaranty adequate control of weeds in several wheat based systems (i.e. continuous wheat, wheat-fallow, wheat-lentil, wheat-corn-fallow, and wheat-forage-fallow). Anderson (2007) reported that integrated weed management under CA may include the combination of applied soil herbicides, time of control, use of crop varieties with high competition against weeds, fallow management and weed biological

characterization. Mrabet (2008) is considering adding to these strategies the analysis of weed seed bank.

If NT systems are considered as advancing techniques in Morocco, it is then important to note that there is a lack of data and knowledge in terms of herbicide fate in the environment (soil, air, water and vegetation). Weed resistance to herbicides can be a challenge to no-till farmers and there is no single solution.

1.2.4. Crop residues and livestock integration

In Morocco's pastoralist society, animal husbandry accounts for a major fraction of total farm income. Hence, the major issue is how to produce enough biomass to protect the soil and to maintain the efficiency of the NT systems, as competition for available biomass is frequently high due to grazing. The major threats to soil productivity and agricultural sustainability are stubble grazing and straw exportation. Traditionally, crop residue destinations include extraction, grazing, in-situ burning, and incorporation, but rarely retention as mulch. The stubble is a '*de facto*' common pool resource due to a combination of high enforcement costs, traditions and norms, or both.

As stated by Ortiz et al. (2008), almost all advantages of the no-till system come from the permanent cover of the soil and only a few from not tilling the soil. Consequently, one serious difficulty for the establishment and adoption of NT systems is controlling stubble grazing to conserve sufficient mulch as soil cover (Magnan et al., 2011).

In order to satisfy a better integration of livestock in NT cropping systems and avoid excessive grazing of stubble and flat residues, forage crops (barley, oat, and vetch) were incorporated as a second crop in wheat-fallow rotation. In terms of yields, wheat performed either equally or better in the 3-year rotation (wheat-forage-fallow) than in

wheat-fallow at Sidi El Aydi, in dry region (Mrabet and Bouzza, 1997). The 3-year rotation also helped improving soil organic matter level compared to other biennial rotations (Mrabet et al., 2001a).

1.3. Achievable no-tillage (NT) impacts on crops and cropping systems

In last 3 decades, a significant number of studies dealt with the effects of NT systems on crop yields for different wheat rotations in dry areas. Most available results comparing cereal yields under NT and conventional tillage systems in dry area of Morocco are presented in table 1.1.

Tab.1.1.Regional assessment of wheat yield ($Mg\ ha^{-1}$) under no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) systems in dry areas of Morocco

Region and Average annual rainfall (mm)	Soil type	Rotation	NT	CT	Years	References
Abda (270 mm)	Vertisol	Wheat-Fallow	3.10	2.40	19	Mrabet (2008)
	Vertisol	Continuous Wheat	1.60	1.60	19	
Chaouia (<350 mm)	Mollisol	Continuous Wheat	2.47	2.36	4	Mrabet (2000a)
	Vertisol	Wheat-Fallow	3.70	2.60	10	Bouzza (1990)
	Vertisol	Continuous Wheat	1.90	1.40	10	Mrabet (2000b)
	Mollisol	Different rotations	2.21	1.90	9	Mrabet (2011)
	Vertisol	Wheat-Chickpea	1.87	0.76	3	Mrabet (2001)
	Rendzina	Wheat-Chickpea	2.53	1.47	9	Mrabet (2010)

Soil type was defined using Soil taxonomy classification

Long-term experiments on tillage systems in these arid areas suggest that moldboard and disk plowing are not sustainable tillage systems of soil management, and that deep plowing and inversion operations for seedbed preparation should be eliminated (Bouzza, 1990).

Results from these long-term trials have shown the following: (1) no-till system produces higher yields than conventional tillage systems; (2) crop rotation increases and stabilizes wheat yield more than continuous cropping; (3) no-till system plus crop rotation result in better energy conversion and balance than conventional tillage and continuous cropping; (4) no-till system combined with crop rotation is more lucrative and results in less risk as compared to conventional tillage and continuous cropping (Mrabet, 2008).

In a 9-year research experiment (starting in 1994), NT was compared with plowing and results revealed that NT wheat either outyielded or equaled CT wheat during the experimental period in arid research station at Jemaat Shim (rainfall < 270 mm) (Mrabet, 2011).

Kacemi et al. (1995) reported that NT system effect on wheat grain yield was found superior or equal to minimum tillage (V-blade Sweeps) for wheat-corn, wheat-lentil and wheat-chickpea cropping systems in two Chaouia and Abda sites in dry region of Central Morocco.

In a single year experiment, Aboudrare (1992) found the same high wheat yielding under NT compared to CT systems in areas receiving 450 mm near Meknes in Sais region. However, Chekli (1991) and Nebras (1992) concluded that reduced tillage system decreased wheat yields compared to CT systems in the same area due to weed and pest infestation. In his field study in Sais region, Boutahar (1992) did not find any differences in wheat yields between CT and NT systems.

When NT systems are used in favorable rainfed zones (> 400 mm), it is very important to make the right choice of crop variety to prevent diseases. Due to residue cover, disease may cause problems in NT farming and screening for varieties with high disease tolerance

for use in NT farming is required (Ramdani et al., 2010). In semiarid areas (< 400 mm), special disease problems in NT have not been reported yet. In wheat, the greatest pest problem is Hessian fly (Lhaloui et al., 2006). The incidence of this insect can be reduced by early seeding and use of resistant varieties

Other crops responded favorably to NT system in dry conditions, including lentil, chickpea and fababean (Kacemi, 1992), vetch-oat (El Brahli et al., 1997) and barley (Mrabet and Bouzza, 1997), either by increasing or not negatively affecting yield in comparison with CT systems.

From the middle of the nineties, a new dissemination approach of NT systems was initiated by agricultural research institutions with the support of agriculture ministry and international organizations. These on-farm trials helped to experiment benefits from the NT system in various locations in dry land. In most of these trials, several crops (wheat, barley, chickpea etc) out-yielded under NT systems that under CT systems (El Gharras et al., 2010).

According to Avci et al. (2007), NT is well adapted to the dry land conditions of Central Anatolia if grass weeds are controlled by pre-emergence spraying of total herbicides. Good weed control in fallow with herbicides may gave higher yields under NT and at least a 50 percent cost saving (Avci, 2005). Poor weed control was also reported by Cakir et al. (2003) as a major reason for low wheat yield under NT in Turkey. Avci (2005) concluded that, in Turkish dryland agriculture, the following results were drawn from a 3-year research: (i) chemical fallow will be a good alternative to clean fallow and particularly provides savings in tillage cost; and (ii) continuous wheat increased the cheat grass infestation. No-tillage aggravated this latter problem. In spite of these drawbacks, no-tillage seemed economic and superior in terms of water conservation and erosion control.

In Tel Hadya (Syria), Pala et al. (2007) related wheat and chickpea NT yield advantages over CT to: (i) higher moisture availability during early growth stages of both crops; (ii) increased infiltration; (iii) reduced evaporation; and (iv) better development of deep root systems utilizing soil moisture in deeper horizons in late dry stages. Tunisian researchers are promoting NT systems in most agro-ecological zones of their country (M'Hedhbi et al., 2003; Ben Moussa-Machraoui et al., 2010). As pointed out by Ben Moussa-Machraoui et al. (2010), the superior crop production effect of NT in comparison to CT is due to lower water evaporation from soil combined with enhanced soil water availability.

1.4. Changes in soil physical and environmental quality under NT

1.4.1. Scarce water storage and conservation

In low rainfall regions (< 250 mm) such as Abda and Ouardigha, long fallowing is traditionally practiced for water storage and conservation in soil profile. Experimental results showed that water storage efficiency in soil improved from 10% in weedy fallow and 18% in black fallow to 28% in chemical fallow. This increased water availability was reflected in higher wheat yields under NT systems (Bouzza, 1990) (Table 1.2). No-till crops become more tolerant to drought because of the better storage of water in the fallow or during the growing season, and this can be used either to increase crop yields, or if sufficient water is available, to increase cropping frequency (Bouzza, 1990). From this author, stored water in 1.2 m profile changed from 30 to 84 mm when shifting from disking to no-tillage.

Tab.1.2. Valuing water from rainfall with no-tillage fallow (Bouzza, 1990)

	Fallow management	Storage efficiency (%)	Stored water ^a (mm)
Chemical / no-tillage fallow	Weeds controlled with herbicides only.	28	84
Cultivated / Black fallow	Weeds controlled with tillage implements, mainly disk harrows.	18	54
Minimum / Stubble mulch fallow	Co-control of weeds with herbicides and tillage, mainly sweeps.	21	63
Weedy / Pasture fallow	Uncontrolled weeds. Weeds used as forage.	10	30

^a = in a 1.2 m deep soil profile.

In the surface soil layer (0-100 mm), water content is usually higher under no-tilled than in tilled soil. Evaporation of water from the soil is reduced with maintenance of mulch cover. Mrabet (1997) showed that time to reach wilting point in a Calcixeroll was proportional to residue cover under no-tillage. As reported by this author, NT with residue cover of 70-80% permitted higher time to reach wilting point than any applied tillage system.

1.4.2. Soil structure and aggregation

Soil porosity based on water-stable aggregates is of primary importance in joint consideration of soil productivity and soil erosion, because it moderates the movement of water, gases and roots within the soil. Aggregate stability near the surface (0-100 mm) in the zero-tilled Calcixerolls in dry area was greater than in the plowed soils (Lahlou & Mrabet, 2001; and Mrabet et al., 2001a). The low compactibility and high aggregate stability under NT in these Calcisols were linked to the accumulation of organic material at the surface causing an increase in organic matter content. Further, in comparison to conventionally tilled soil, this organic matter under NT also contained a greater portion of

particulate organic carbon, probably of microbial origin (Bessam and Mrabet, 2001; 2003b), and involved in stabilizing soil aggregates (Table 1.3).

Tab.1.3. Effects of tillage systems on soil surface aggregation in two cereal regions of Morocco

Region	Soil type	Depth (mm)	Years	NT	CT	References
Chaouia	Mollisol	0-25	4	65 ^a	48	Lahlou & Mrabet (2001)
	Mollisol	0-25	11	3.78 ^b	3.21	Mrabet et al. (2001a)

a = % of 1-2 mm stable aggregates according to Kemper & Rosenau (1986).

b = Mean weight diameter of aggregates (mm) according to Youker & McGuinness (1956).

1.4.3. Soil erosion and water infiltration

Erosion is the most important threat to food production and security in Morocco. The traditional tillage system based upon off-set disking caused runoff and soil loss under rainfall simulation and favored surface sealing (Dimanche & Hoogmoed, 2002).

Rainfall infiltration is improved under NT system, which for heavy textured soils the amount of soil water available for plants increases (Bouzza, 1990) and for structurally weak soils, formation of crusts is eliminated with residue mulch. Hence, for most soils, infiltration properties are improved under NT system. These increased infiltration rates under NT are due to better aggregate stability and bioporosity. As shown for a Vertic Mollisol in Chaouia region (Fig 1.1), water infiltration rates under well-managed NT are higher over extended periods than under CT systems. These results are in agreement with those found by Dimanche (1997) for Sais region on a clay soil.

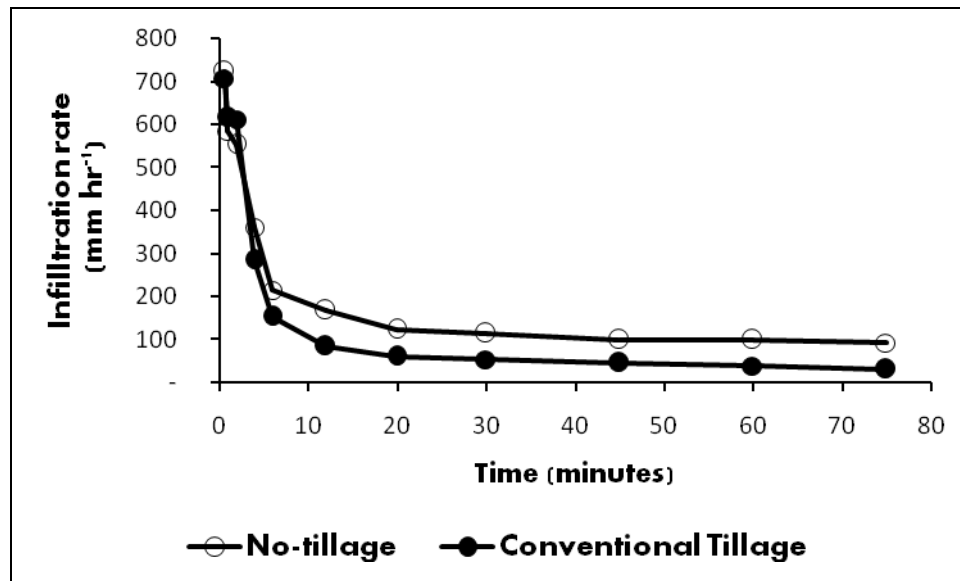


Fig.1.1. Impact of tillage system on infiltration process in Sidi El Aydi clay soil.
Conventional tillage = off-set disking (Mrabet, 2008)

1.4.4. Soil bulk density, pore size distribution and compaction

Soil compaction is a common problem in Morocco, especially with continuous use of tillage implements and livestock on degraded soils (Oussible et al., 1992). Compaction damages soil structure at the surface and below, resulting in quicker saturation of affected soil horizons and an increased runoff.

One of the most striking effects of NT systems is the increased density of topsoil in early years of experimentation in arid zone (Chaouia) in a Mollisol (Lahlou, 1999). Further research in these aspects is needed to accurately judge on soil behavior and compaction under NT vis-à-vis CT under different soils and climate conditions.

1.5. No-tillage impacts on soil chemical quality and carbon sequestration

1.5.1. Carbon emission abatements with no-tillage systems

According to Lal (2004), all operations involving mechanical soil disturbance for seedbed preparation affect directly and indirectly soil CO₂ emissions. Reicosky & Saxton (2006)

reported that NT reduces CO₂ loss to 50 g C per m² from the loss of 250 g C per m² under moldboard plowing in 19 days after tillage. In NE Spain, soil CO₂ emissions just after tillage were 40% higher under conventional tillage than under no-tillage as the CO₂ accumulated in soil pores was released to the atmosphere after the tillage event (Álvaro-Fuentes et al., 2004; 2008).

Tab.1.4. Energy, time and power use by different tillage systems in Morocco (El Gharras et al., 2004).

Tillage systems	Power (Horse power/m)	Time (Hours/ha)	Fuel use (Liter/hr)	Number of passes
Conventional tillage system	100-140	6.5-8.5	31-45	4
1. Deep disking	50-70	3-4	10-15	
2. Stubble plow	20-30	2-2.5	10-12	
3. Seedbed preparation	15-25	1-1.5	6-8	
4. Seeding	15	0.5	5	
Simplified tillage system	50-70	3.5-5	21-25	3
1. Stubble plow	20-30	2-3	10-12	
2. Seedbed preparation	15-25	1-1.5	6-8	
3. Seeding	15	0.5	5	
Traditional tillage system	30-40	2-2.5	11-13	2
1. Off-set disking	15-25	1-1.5	5-8	
2. Seeding	15	0.5	5	
No-tillage	25-35	0.6-1	5-7	1

From the study by Uri et al. (1999), expanded across a wide area, NT has potential to slow and even reverse rate of emissions of CO₂ and other greenhouse gases by agriculture sector. With NT, reduced use of tractors and other powered farm equipment results in lesser emissions of exhaust gases. No-tillage is about eight times more efficient in fuel consumption than CT (El Gharras et al., 2004; Table 1.4). In studies by Bourarach (1989) and Chekli (1991), machinery and fuel costs tend to be lower in no-till systems, with CT systems requiring 3.2 times more fuel.

Unfortunately, there is a lack of study assessing the soil CO₂ emission under NT compared to CT in Morocco. Further research is needed on this topic.

1.5.2. No-tillage as a prime strategy for carbon sequestration

Worldwide, the literature abounds in references to soil organic matter (SOM) under contrasting tillage and cropping systems. However, SOM research is scarce in south-Mediterranean countries.

No-tillage impacts soil organic carbon (SOC) stock in two ways: (i) by reducing disturbance which favors the formation of soil aggregates and protects SOC encapsulated inside these stable aggregates from rapid oxidation (Six et al., 2000); and (ii) by modifying the local edaphic environment; bulk density, pore size distribution, temperature, water and air regime that might restrict SOM biodegradation (Kay & VandenBygaart, 2002). Paustian et al. (1998) summarized the rate of accumulation of SOC stock under NT at 300-800 kg C ha⁻¹ year⁻¹.

The stratification of soil properties is an important effect of NT (Mrabet, 2002) that could potentially be used as an indicator of soil quality (Franzluebbers, 2002). Maintenance of residue mulch at (or near) the surface under NT increases the ability of soil to sequester CO₂ (Table 1.5) in Chaouia region. In a clay soil at (0-200 mm) horizon, Mrabet et al. (2001a) found, following 11 years of NT in Calcixeroll soil, in dry region that SOC content increased by 13.6% compared to CT.

Tab.1.5. Impact of tillage system on soil organic carbon (g/100g) in surface horizon

Region	Soil type	Depth (mm)	Number of years	NT	CT	Reference
Chaouia	Mollisol	0-25	5	1.73	1.66	Bessam & Mrabet (2003)

Increased organic matter also improves nutrient content (Mrabet et al., 2001b) and water holding capacity of the soil (Mrabet et al., 2003) (Table 1.6). Mrabet (2008) did not find any SOC depletion at lower depths with NT compared to CT but rather a build-up in surface horizon with NT. López-Garrido et al. (2011) showed that for long-term NT use, nutrients and SOC measurements with depths are needed to demonstrate the effect of conservation tillage on C sequestration and nutrient distribution and build-up in different Mediterranean environment.

Tab.1.6. Impact of tillage system on soil organic carbon and nitrogen ($Mg\ ha^{-1}$) in (0-200 mm) horizon (Mrabet et al., 2001a).

Tillage system	Organic carbon	Total nitrogen
No-tillage	37.28 a (13.6%)	3.52 a
Conventional Tillage	33.92 b (3.3%)	3.28 b
Average	35.58	3.35

Numbers between parentheses indicate increase in SOC after 11 years.

Within the same column, values followed by the same letter are not significantly different using LSD test at 5%.

1.5.3. Exchangeable cations, pH and cation exchange capacity

There is a slight acidification of the soil at the surface under NT, which may increase nutrient availability to crops (Table 1.7). The absence of soil mixing following fertilizer application generally results in higher soil acidity, of at least at the soil surface, while pH of lower soil layers may change very little.

Tab.1.7. Soil extractable-P, exchangeable K and pH under no- and conventional tillage applied for 11 years (Mrabet et al., 2001b).

Depth (mm)	No-tillage	Conventional tillage	Difference
Extractable P (mg/kg)			
0 – 25	29.9a	18.0b	11.9
25 – 70	19.3a	16.5b	2.8
70 – 200	8.7b	10.9a	–2.2
Exchangeable K (mg/kg)			
0 – 25	476.4a	284.1b	192.3
25 – 70	291.7a	256.9b	34.8
70 – 200	148.6b	177.9a	–29.3
pH water			
0 – 25	7.8b	8.0a	–0.2
25 – 70	8.1a	8.0a	0.1
70 – 200	8.2a	8.2a	0

Means followed by the same letters in the row do not differ by LSD test at $p = 0.05$

The cation exchange capacity (CEC) and base saturation are usually adequate in experimental station's soils. The Sidi el Aydi soil had a CEC of 50 cmol(+) kg⁻¹ at initiation of the experiment (Mrabet et al., 2001a). Results in Table 1.8 show that tillage system did not significantly affect CEC and exchangeable cations (Na and Ca). However, NT has accumulated more potassium and depleted the soil surface in its Mg pool. Under CT, possible loss of CEC with decreasing organic matter may represent an issue in the long-term, especially if there is some link with aggregate stability and dispersitivity.

Tab.1.8. Influence of tillage system on cation exchange capacity (CEC) and exchangeable cations (cmol(+) kg⁻¹) at the seed zone (0-50 mm) of the Sidi El Aydi soil (Chaouia, Morocco) (Mrabet, 2008).

Tillage system	CEC	Ca ⁺	Mg ⁺	Na ⁺	K ⁺
No-tillage	48.5a	62.8a	6.85b	0.36a	1.64a
Conventional Tillage	48.6a	63.5a	9.29a	0.41a	1.09b
Average	48.5	63.2	8.07	0.38	1.36

In the same column, values followed by same letter are not different (LSD, 5%).

1.6. Conclusions

Over the past 3 decades in Morocco, efforts have been carried out to define and develop NT systems as management strategies which are resource conserving, non-exploitative and yield enhancing and which minimize and/or reduce adverse environmental impacts. This paper provides a comprehensive inventory of the existing knowledge on sustainable no-tillage agriculture in dry land of Morocco. The available data showed that with adoption of no-tillage (conservation agriculture principles) farmers can re-build the harmony between soils and crops and minimize adverse effects of climate (droughts) in arid zones. Nonetheless, information about the effect of NT on semiarid and humid soils (rainfall > 350mm) is lacking and further research is needed to accurately judge the effect of NT (vis-à-vis CT) under these areas noted for its high climate variability and fragile soils. Long-term research in these areas and extension programs needs strong attention for increasing the desirability and adoptability of NT technology.

1.7. References

- Aboudrare, A., 1992. Effet du travail du sol, du mode de semis et du désherbage sur l'économie de l'eau et le rendement des blés dur et tendre, cas des terrains en pente de la région de Meknès. Mémoire de 3^{ème} Cycle. IAV Hassan II, Rabat. 167p.
- Alvaro-Fuentes, J., López, M.V., Gracia, R. & Arrúe, J.L., 2004. Effect of tillage on short-term CO₂ emissions from a loam soil in semi-arid Aragón (NE Spain). *Opt. Médit.* 60, 51–54.
- Alvaro-Fuentes, J., Arrúe, J.L., Gracia, R. & López, M.V., 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma*. 145, 390–396.
- Anderson, R.L., 2007. Managing weeds with a dualistic approach of prevention and control. A review. *Agron. Sust. Dev.* 2, 13–18.
- Avci, M., 2005. Zero and minimum tillage as alternatives to conventional cultivation in dryland fallow/wheat and annual cropping systems in central Anatolia, in. Pala, M. et al. (Eds.), *Proceedings of a workshop organized by the Optimizing Soil Water Use (OSWU) Consortium 22-26 April 2002, Ankara, Turkey*, p. 89-100.
- Avci, M., Meyveci, K., Akar, T., Ozdemir, B., Yürürer, A., Karakurt, E., Sürek, D. & Karaçam, M., 2007. Turkish experience on dryland agronomy. lessons from the past and the recent experiments. *J. Agric. Res.* 45, 33-45.
- Badraoui, M. & Dahan, R., 2010. The Green Morocco Plan in relation to food security and climate change, in. Solh, M., Saxena, M.C. (Eds.), *Proceedings of International Conference on Food Security and Climate Change in the Dry Areas, 1-4 February 2010, Amman, Jordan*, ICARDA Publication, p. 61-70.

- Bahri, A., Von Bargen, K. & Bansal, R.K., 1993. Forrow openers and presswheels evaluation for no-till wheat sowing. *Al Awamia*. 83, 197-207.
- Bahri, A. & Bansal, R.K., 1992. Evaluation of different combinations of openers and presswheels for no-till seeding. *Homme Terre & Eaux*. 22, 55-66.
- Balaghi, R., Jlibene, M., Tychon, B. & Mrabet, R., 2006. Gestion du risque de sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse*. 18, 169-176.
- Ben Moussa-Machraoui, S., Errouissi, F., BenHammouda, M. & Noura S., 2010. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semiarid conditions in north-western Tunisia. *Soil Till. Res.* 106, 247-253.
- Ben Salem, H. & Smith, T., 2008. Feeding strategies to increase small ruminant production in dry environments. *Small Rum. Res.* 77, 174–194.
- Bessam, F. & Mrabet R., 2001. Time influence of no tillage on organic matter and its quality of a vertic Calcixeroll in a semiarid area of Morocco, in. Garcia-Torres, L. et al. (Eds.), *Proceedings of I World Congress on Conservation Agriculture*. Madrid, Spain. October 1-5, 2001, pp. 281-286.
- Bessam, F. & Mrabet, R., 2003. Long-term changes in soil organic matter under conventional and no-tillage systems in semiarid Morocco. *Soil Use Man.* 19, 139-143.
- Boulanouar, B. & Benlekhal, A., 2006. L'élevage ovin au Maroc: de la production à la consommation, in. Boulanouar, A., Paquay, R. (Eds.), *L'élevage du mouton et ses systèmes de production au Maroc*. Publication INRA, Rabat.
- Bourarach, E.H., 1989. Mécanisation du travail du sol en céréaliculture pluviale. performances techniques et aspects économiques dans une région semi-aride au Maroc. Thèse de Doctorat Es-Sciences Agronomiques, IAV Hassan II, Rabat, Maroc. 123p.

- Bourarach, E.H., Bouzza, A. & Nousfi, A., 1998. Développement d'un système d'enterrage de semoir direct pour le travail en sol sec. *Homme Terre & Eaux*. 28, 5-10.
- Boutahar, K., 1992. Quel travail du sol pour l'installation des céréales sous climat semi-aride ? *Compte-rendu CEAMA, ENA Meknès, Maroc*. 7p.
- Bouzza, A., 1990. Water conservation in wheat rotations under several management and tillage systems in semiarid areas. PhD. Dissertation, Univ. of Nebraska, Lincoln, USA. 125p.
- Cakir, E., Aykas, E. & Yalcin, H., 2003. Tillage parameters and economic analysis of direct seeding, minimum and conventional tillage in wheat, in. *Proceedings 16th Triennial Conference of International Soil Tillage Research Organisation*, 13-18 July, 2003. Brisbane, Australia, p. 259–264.
- Chbouki, N., Stockton, C. W. & Myers, D., 1995. Spatio-temporal patterns of drought in Morocco. *Int. J. Climatol.* 15, 187- 205.
- Chebbi, H.E. & El Mourid, M., 2005. L'agriculture au Maghreb. Une lecture du contexte économique. ICARDA Publication, Tunis.
- Chekli, H., 1991. Eléments du choix des séquences d'installation de la culture du blé dans la région de Meknès. Modification des états structuraux et aspects énergétiques. Thèse de Doctorat Es-Sciences Agronomiques, IAV Hassan II, Rabat, Maroc. 229p.
- Dahane, D., 1992. Comparaison de trois semoirs commerciaux et un semoir expérimental. Mémoire de 3^{ème} cycle Agronomie. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- Dai, A., Trenberth, K. E. & Qian, T., 2004. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870–2002. Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeo.* 5, 1117- 1130.

- Dimanche, P. H., 1997. Impacts de différents itinéraires techniques du travail du sol sur la dégradation des sols argileux dans la région de Meknès (Maroc). Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques et en Ingénierie Biologique. Univ. Catholique de Louvain, Belgique, 268p.
- Dimanche, P. H. & Hoogmoed, W.R., 2002. Soil tillage and water infiltration in semi-arid Morocco. the role of surface and sub-surface soil conditions. *Soil Till. Res.* 66, 13-21.
- Dumanski, J., Peiretti, R., Benites, J.R., McGarry, D. & Pieri, C., 2006. The paradigm of conservation tillage. *Proc. World Assoc. Soil Water Cons.* P1, 58-64.
- El-Brahli, A., Bouzza, A. & Mrabet, R., 1997. Stratégies de lutte contre les mauvaises herbes dans plusieurs rotations céréalières en conditions de labour et de non-labour, in. *Rapport Annuel, INRA Settât*, p. 171-174.
- El-Brahli, A. & Mrabet, R., 2001. La jachère chimique. Pour relancer la céréaliculture non-irriguée en milieu semi-aride Marocain. Actes de la Journée nationale sur le désherbage des céréales. INRA, 23 Novembre 2000, Settât - Maroc, p. 133-145.
- El Gharras, O. & Idrissi, M., 2006. Contraintes technologiques au développement du semis direct au Maroc. *Opt. Médit.* 69, 121–124.
- El Gharras, O., Ait Lhaj, A. & Idrissi, M., 2004. Développement d'un semoir non labour industriel, in. M'Hedhbi, K. et al. (Eds.), *Actes des 2^{èmes} rencontres méditerranéennes sur le semis direct*. 19-22 Janvier 2004, Tabarka, Tunisie, p. 74-81.
- El Gharras, O., El Hantaoui, N. & El Brahli, A., 2010. Le semis direct dans la Chaouia. Perspective de développement dans le cadre du PMV. *Agric. Maghreb.* 46, 90–93.
- Esper, J., Frank, D., Buntgen, U., Verstege, A., Luterbacher, J. & Xoplaki, E., 2007. Long-term drought severity variations in Morocco. *Geophys. Res. Lett.* 34, 17702.

- FAO (Food and Agriculture Organization). 2002. Conservation Agriculture. matching production with sustainability. Land and Water Digital Media Series No. 18, FAO, Rome, Italy.
- Franzluebbers, A.J., 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66, 95-106.
- Kacemi, M., 1992. Water conservation, crop rotations, and tillage systems in semiarid Morocco. PhD Dissertation. Colorado State University. Fort Collins, CO. USA. 203p.
- Kacemi, M., Peterson, G.A. & Mrabet, R., 1995. Water conservation, wheat-crop rotations and conservation tillage systems in a turbulent Moroccan semiarid agriculture, in. El Gharrous, M. et al. (Eds.), *Challenges in Moroccan dryland agriculture*. INRA, Rabat, p. 83-91.
- Kay, B.D. & VandenBygaart, A.J., 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66, 107-118.
- Knippertz, P., Christoph, M. & Speth, P., 2003. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorol. Atmos. Phys.* 83, 67–88.
- Kemper, W.D. Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution, in. Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, 425-442.
- Lahlou, S., 1999. La qualité physique du sol sous différents systèmes de travail du sol et de management des cultures en zones semi-arides Marocaines. Diplôme des Etudes Supérieures Approfondies, Faculté des Sciences, El-Jadida, Maroc. 60p.
- Lahlou, S. & Mrabet, R., 2001. Tillage influence on aggregate stability of a Calcixeroll soil in semiarid Morocco, in. Garcia-Torres, L. et al. (Eds.), *Proceedings of I World Congress on Conservation Agriculture*. Madrid, Spain. October 1-5, 2001, pp. 249-254.

- Lal, R., 2004. Carbon emission from farm operations. *Environ. Int.* 30, 981-990.
- Lhaloui, S., Bouhssini, M., Naserlhaq, N., Amri, A., Nachit, M., El Haddouri, J. & Jlibene, M., 2006. Les cécidomyies des céréales au Maroc. Biologie, dégâts et moyens de lutte. Publication INRA, Rabat.
- López-Garrido, R., Madejón, E., Murillo, J.M. & Moreno, F., 2011. Short and long-term distribution with depth of soil organic carbon and nutrients under traditional and conservation tillage in a Mediterranean environment (southwest Spain). *Soil Use Man.* 27, 177–185.
- Magnan, N., Lybbert, T. J., Mrabet, R. & Fadlaoui, A., 2011. The quasi-option value of delayed input use under catastrophic drought risk. The case of no-till in Morocco. *Am. J. Agr. Econ.* 93, 498-504.
- M'Hedhbi, K., Ben Hammouda, M., Letourmy, P., Nasr, K., Ali Hannachi, M., Chouen, S., Mahouachi, M.A., Jarrahi, T., Nasraoui, R., Zaouani, R. & Fakhfakh, M.M., 2003. Résultats agronomiques de production pour les semis directs et conventionnels, in: M'Hedhbi, K. et al. (Eds.), *Actes 2^{èmes} rencontres méditerranéennes sur le semis direct*. 19-22 Janvier 2004 Tabarka, Tunisie, p. 87-89.
- Mrabet, R., 1997. Crop residue management and tillage systems for water conservation in a semiarid area of Morocco. PhD Diss. Colorado State Univ. Fort Collins, CO. USA. 220p.
- Mrabet, R. & Bouzza, A., 1997. Conservation de l'eau sous différentes rotations céréalières et systèmes de gestion des résidus de récolte en semi-aride. INRA Rapport annuel. Centre Aridoculture, Settlat, Maroc, p. 42-46.
- Mrabet, R., 2000a. Long-term No-tillage influence on soil quality and wheat production in semiarid Morocco, in: *proceedings of the 15th ISTRO Conference Tillage at the Threshold of the 21st Century. Looking Ahead*, July 2-7, 2000, Fort Worth, Texas, USA.

- Mrabet, R., 2000b. Differential response of wheat to tillage management systems under continuous cropping in a semiarid area of Morocco. *Field Crops Res.* 66,165–174.
- Mrabet, R. 2001. Le Système de semis direct. Pour une agriculture Marocaine durable et respectueuse de l'environnement, in. Séminaire sur les aléas climatiques et politiques agricoles. Association Marocaine de l'Agroéconomie, 24-25 Mai 2001. Rabat, Maroc, p. 337-348.
- Mrabet, R., Ibno-Namr, K., Bessam F. & Saber, N., 2001a. Soil chemical quality changes and implications for fertilizer management after 11 years of no-tillage wheat production systems in semiarid Morocco. *Land Degrad. Dev.* 21, 1–13.
- Mrabet, R., Saber, N., El-Brahli, A., Lahlou, S. & Bessam, F., 2001b. 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., 2002. Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. *Soil Till. Res.* 66, 119-128.
- Mrabet, R., El-Brahli, A., Bessam, F. & Anibat, I., 2003. No-Tillage Technology. Research review of impacts on soil quality and wheat production in semiarid Morocco. *Options Méditerranéennes* 60, 133-138.
- Mrabet, R., 2008. No-tillage systems for sustainable dryland agriculture in Morocco. INRA Publication. Rabat.
- Mrabet, R., 2010. Crop residue management technologies. trade-off between environmental impacts, livestock durability and bioenergy production in semi-arid Morocco, in. Steele, P. et al. (Eds.), *Proceedings of the 2nd FAO expert consultation - Utilization of agricultural residues – emphasis on biofuels*, FAO Publication, Egypt, p. 11-26.

- Mrabet, R., 2011. Effects of residue management and cropping systems on wheat yield stability in a semiarid Mediterranean clay soil. *Am. J. Plant Sci.* 2, 202-216.
- Nebras, M. 1992. Impact des séquences d'installation du blé tendre sur la réussite du semis et la valorisation de l'eau. Cas d'un terrain en pente dans la région de Meknès. Mémoire de 3^{ème} cycle. IAV Hassan II, Rabat, Maroc. 142p.
- Nousfi, A. 1993. Contribution à l'amélioration de système d'enterrage d'un semoir direct. Mémoire de 3^{ème} cycle. IAV Hassan II, Rabat, Maroc. 79p.
- Ortiz, R., Sayre, K.D., Govaerts, B., Gupta, R., Subbarao, G.V., Ban, T., Hodson, D., Dixon, J.M., Ortiz-Monasterio, J.I. & Reynolds, M., 2008. Climate change. Can we beat the heat? *Agri. Eco. Env.* 126, 46–58.
- Oussible, M., Crookston, R.K. & Larson, W.E., 1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.* 84, 34-38.
- Pala, M., Haddad, A. & Piggin, C., 2007. Challenges and opportunities for conservation cropping. ICARDA experience in dry areas, in. Stewart, B.A. et al. (Eds.), *Proceedings of international workshop on conservation agriculture for Sustainable land management to improve the livelihood of people in dry Areas*, GTZ, 7-9 May, 2007, Damascus, p.165-181.
- Parr, J.F., Papendick, R.I., Hornick, S.B. & Meyer, R.E., 1990. The use of cover crops, mulches and tillage for soil water conservation and weed control, in. *Organic-matter management and tillage in humid and sub-humid Africa*. IBSRAM Proceedings No.10. Bangkok, p. 246-261.
- Paustian, K., Cole, C.V., Sauerbeck, D. & Sampson, N., 1998. CO₂ mitigation by agriculture. An overview. *Climatic Change*. 40, 135-162.
- Ramdani, A., Mrabet, R. & Gomez Macpherson, H., 2010. Performance of Moroccan wheat cultivars under tillage systems and water regimes. *J. Agri. Sci. Tech.* 4, 106-111.

- Reicosky, D.C. & Saxton, K.E., 2006. Reduced environmental emissions and carbon sequestration, in. Baker, C.J. et al. (Eds.), No-tillage seeding in conservation agriculture. FAO and CAB International, Rome, p. 257-267.
- Ryan, J., de Pauw, E., Gomez, H. & Mrabet, R., 2006. Drylands of the Mediterranean zone. Biophysical resources and cropping systems, in. Peterson, G.A. et al. (Eds.), Dryland Agriculture. ASA Monograph N° 23. Wisconsin, p. 577-624.
- Six, J., Elliott, E.T. & Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation. A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. Soil Biol. Biochem. 32, 2099–2103.
- Touchan, R., Anchukaitis, K.J., Meko, D.M., Sabir, M., Attalah, S. & Aloui, A., 2011. Spatio-temporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. Clim. Dynam. 37, 237-252.
- Uri, N.D., Atwood, J.D. & Sanabria, J., 1999. The environmental benefits and costs of conservation tillage. Environ. Geol. 38, 111-125.
- Youker, R.E. & McGuinness, J.L., 1956. A short method of obtaining mean weight-diameter values of aggregate analysis of soils. Soil Sci. 83, 291-294.

Chapitre 2. Caractérisation des Vertisols du Maroc (Tirs)

Ce chapitre est adapté à partir d'un article bibliographique (Review paper) en préparation.

Caractérisation des Vertisols du Maroc (Tirs)

Résumé

Au Maroc, les Vertisols connus par le nom vernaculaire du Tirs, sont souvent utilisés pour la céréaliculture et l'arboriculture. Cependant, ces sols sont difficilement aménageables vu leur teneur élevée en argiles gonflantes et la présence de fentes de retraits. Ce chapitre présente un état d'art sur les Vertisols et leur distribution dans le monde. Ensuite, il a mis l'accent sur les critères de classification pédologique de ces sols dans le système utilisé au Maroc (CPCS, 1967) et le système Américain (Soil Taxonomy). Par ailleurs, une partie de ce chapitre traitera la typologie des Tirs et leur degré de similitude avec la classe des Vertisols avant de conclure par un bref aperçu sur les contraintes majeures liées à leur aménagement.

2.1. Introduction

Les Vertisols, en général, constituent des sols très fertiles dans plusieurs pays développés et en voie de développement (Ahmad, 1996 ; Coulombe et al., 1996 ; IBSRAM, 1987). Cependant, ces sols sont souvent sous-utilisés pour la production agricole et ce constat est observé même dans les régions où la population souffre de la mal nutrition et de la pauvreté (Vandermerwe et al., 2001). En effet, les Vertisols ont généralement un potentiel de production important mais ils sont difficilement aménageables (Deckers et al., 2001). Leur teneur élevée en minéraux argileux gonflants (smectites) réduit l'intervalle de l'humidité optimale pour le labour (Ahmad, 1996).

Durant les dernières décennies, un intérêt international a été porté pour améliorer l'aménagement de ces sols afin d'augmenter leur production agricole. En Afrique, où ces sols occupent plus d'un million d'hectares, une amélioration de leur gestion contribuera à

inverser la tendance actuelle de déficit alimentaire en un surplus de production agricole (Ahmad, 1996). La recherche sur les Vertisols a aussi été intensifiée dans plusieurs régions au monde, particulièrement dans les processus de pédogénèse et la classification de ces sols grâce aux travaux de la Commission Internationale pour les Vertisols (ICOMERT).

Au Maroc, les Vertisols connus par le nom vernaculaire du Tirs, sont de loin les plus productifs (Bryssine, 1980, Mrabet, 1989) et on les réserve pour les cultures industrielles, l'arboriculture et la céréaliculture (Badraoui, 2006).

2.2. Distribution et propriétés des Vertisols

2.2.1. Caractéristiques et classification des Vertisols

Dans la classification Américaine ((Soil Survey Staff, 1975), les Vertisols sont caractérisés par leur propriété de se rétrécir à sec et se détendre quand ils sont humides, ce qui provoque la formation de fentes de retrait et qui peuvent être de 50 cm à plus d'un mètre (Booltink et al., 1993). Cette propriété dépend de la nature du matériel parental qui contient plus de 30 % d'argile et qui est dominé par les smectites (Ahmad, 1996).

Les Vertisols ont attiré l'attention des chercheurs dès 1898 quand les sols noirs (black soils) ont été distingués dans la Péninsule Indienne par leur haut potentiel de production (Leather, 1898). Ensuite des études ont concerné ces sols aux USA (Anderson & Byers, 1931) et au Soudan (Dudal, 1965). Les agriculteurs distinguent les Vertisols en se basant sur leur couleur et leur texture (Dudal & Eswaran, 1988).

2.2.2. Distribution dans le monde

En 1965, la surface des sols argileux noirs (dark clay soil) dans les tropiques et les subtropiques a été estimée d'environ 257 million d'hectares. Cependant, il a été difficile de savoir si ces sols correspondent à la définition pédologique des Vertisols (Dudal, 1965).

Ces sols noirs ont été localisés dans plus de 76 pays avec une grande superficie en Australie (70 millions ha), Inde (60 millions ha) et Soudan (50 million ha).

Dans son dernier inventaire, USDA-SCS (1994), estimait la superficie occupée par les Vertisols dans le globe d'environ 308 million d'hectares. Cependant, la superficie exactement occupée par ces sols dans le monde n'est pas bien définie car plusieurs pays n'ont pas encore inventorié toutes leurs ressources en sols (Coulombe et al., 1996). En plus, les Vertisols ont souvent de petites superficies sur les études pédologiques détaillées mais ils ne peuvent pas être représentés lors de la compilation des cartes à des échelles nationales (Ahmad, 1996).

Les Vertisols se trouvent dans plusieurs zones climatiques et sont plus abondants dans les régions tropicales et subarides du monde (Ahmad, 1996). Dans les tropiques, ils occupent une superficie de 60%, dans les régions subtropicales de 30% et 10% dans les régions plus humides (Dudal & Eswaran, 1988; Wilding & Coulombe, 1996). Les Vertisols sont des ressources naturelles importantes pour la production agricole dans de nombreux pays comme l'Australie, l'Inde, la Chine, les îles des Caraïbes et les Etats-Unis (Ahmad, 1996; Coulombe et al, 1996).

En raison des caractéristiques de retrait-gonflement et l'adhérence, les Vertisols sont connus par un nombre important de noms locaux et vernaculaires (Tableau 2.1) (Dudal, 1965; Dudal & Eswaran, 1988). Parfois dans le même pays, ils peuvent avoir plusieurs noms, comme en Inde où ils sont connus avec 13 noms différents (Murthy et al., 1982).

Tab.2.1. Les noms attribués au Vertisols ou aux sols à caractère vertique

Nom vernaculaire	Zone	Nom vernaculaire	Zone	Nom vernaculaire	Zone
<i>Barros pretos</i>	Portugal	<i>Subtropical black clays</i>	Afrique	<i>Tropical black soils</i>	Afrique, Inde
<i>Black clays</i>	Afrique du Sud et Australie	<i>Sols noirs tropicaux</i>	Afrique	<i>Gilgai soils</i>	Australie
<i>Shachiang soils</i>	Chine	<i>Terra nera</i>	Italie	<i>Regur</i>	Inde
<i>Black cracking soils</i>	Ouganda	<i>Terras negras tropical</i>	Mozambique	<i>Smolnitza</i>	Bulgarie, Roumanie
<i>Black earths</i>	Afrique, Australie	<i>Terras negras del Andalusia</i>	Espagne	<i>Smonitza</i>	Autriche
<i>Black turfs</i>	Afrique du Sud	<i>Tropical black earth</i>	Angola, Ghana	<i>Sols de palads</i>	France
<i>Dark clay soils</i>	U.S.A	<i>Margalite soils</i>	Indonésie	<i>Tirs</i>	Maroc

D'après Dudal & Eswaran (1988)

2.2.3. Distribution en Afrique

Il existe plusieurs estimations des surfaces occupées par les Vertisols en Afrique (Dudal & Eswaran, 1988). Les derniers estiment que les Vertisols occupent environ 120 millions d'hectares, ce qui représente 35% des Vertisols du monde (Ahmad, 1996). Ils sont répartis sur plusieurs pays (Tableau 2.2) et zones climatiques ; environ 50% sont situés dans les étages bioclimatiques semi-aride et subhumide avec un régime de pluies de 200 à 800 mm. L'importance des Vertisols est surtout ressentie au Soudan et en Ethiopie mais aussi dans les pays du Centre de l'Afrique comme le Zimbabwe, la Somalie, le Niger, le Nigeria, le Ghana, la Côte d'Ivoire, le Togo et l'Afrique du Sud ainsi que dans le Nord d'Afrique notamment au Maroc (Coulombe et al., 1996).

Tab.2.2. La distribution des Vertisols en Afrique

Pays	Superficie (M ha)	Pays	Superficie (M ha)	Pays	Superficie (M ha)	Pays	Superficie (M ha)
Angola	0,5	Ghana	0,2	Mozambique	1,1	Soudan	50
Bénin	0,1	RD Congo	0,3	Namibie	0,7	Tanzanie	7
Botswana	0,5	Cote d'Ivoire	2,8	Niger	0,1	Togo	0,1
Burkina Fasso	0,4	Madagascar	0,8	Nigéria	4	Ouganda	1,7
Cameroun	1,2	Malawi	1	Sénégal	0,2	Zambie	5
Egypte	1	Mali	0,7	Somalie	0,8	Afrique du	2,1
Ethiopie	13	Maroc	0,2 *	Zimbabwe	1,8	Sud	

D'après Ahmad (1996). (*) Cette superficie est inférieure à notre actuelle estimation qui est de 0,9 M ha.

2.3. Vertisols du Maroc: classification et typologie

L'état d'avancement des études pédologiques, cartographiques ou typologiques ont permis de se rendre compte que les Vertisols peuvent être assimilés dans une grande famille de sols décrits dans diverses régions du monde. On dénombrerait une quarantaine de sols qui se ressemblent dans cette catégorie. Dans les pays Méditerranéens, ils portent le nom de "Barros pretos" au Portugal, "Terra negra" en Italie, " Terras negras del Andalucia " en Espagne, "Touers" en Algérie, "Terre noire" de Limagne en France et "Tirs" au Maroc. Plus loin, on les dénomme "Dark clay soils" aux USA et "Gilgai Soil" en Australie (Tableau 2.1). Malgré que ces sols aient des dénominations différentes, ils se rapprochent entre eux par les caractères physiques et morphologiques ; cependant la description des profils et leur étude au laboratoire divergent d'un auteur à l'autre. Parfois ces sols sont assimilés à des classes de sols déjà décrits et étudiés et parfois ils sont classés à part. En effet, les " Barros", les " Terras negras" ou les sols " Terra nera" ont été considérés comme

des sols à part et ils étaient approchés à des sols alluviaux jusqu'à une époque assez récente (Ahmad, 1996).

Au Maroc, les premiers pédologues ont classé les "Tirs" parmi les sols steppiques (Miège & Bryssine, 1941), les sols hydropédiques (Del Villar, 1953) et les sols hydromorphes (Aubert, 1963). Depuis l'adoption par les pédologues marocains de la classification française (CPCS, 1967), les "Tirs" ont été classés dans la classe des Vertisols et dans les travaux pédologiques effectués au Maroc, le terme "Tirs" est souvent remplacé par celui de Vertisol (Bryssine, 1980).

Certes l'assimilation des "Tirs" à des Vertisols a pu résoudre le problème de la classification pédologique, cependant elle a pu créer de la confusion en termes de pédogenèse des "Tirs", leur évolution et par conséquent leur nature. En effet, si l'on compare les différentes données analytiques qui s'y rapportent, on peut se rendre compte qu'on attribue souvent aux "Tirs" des qualités et des défauts qu'ils ne possèdent pas et passant sous silence ceux qui leur sont propres (Bryssine, 1980).

Ainsi, il s'est avéré intéressant de comparer les données analytiques des profils types des "Tirs" avec d'autres profils de Vertisols du monde. Ces données permettront de baser la typologie des "Tirs" non pas uniquement d'après leur morphologie, mais surtout d'après les résultats de leurs analyses physiques, chimiques et minéralogiques.

Cependant, peu d'études ont traité de la genèse des Tirs. Pour ce, souvent les travaux sur ce sujet sont relativement anciens et publiés dans des rapports internes (Bryssine, 1969 ; Hess & Shoen, 1964 ; Shoen, 1965 ; Watteau, 1967; Wilbert, 1965 ; ...etc.).

2.3.1. Classification des Vertisols

Pour mieux comparer les Tirs avec les Vertisols du monde, il est judicieux de comprendre la définition et le classement des Vertisols dans deux classifications utilisées au Maroc et dans le monde. Ces classifications pédologiques sont la classification Américaine (Soil Survey Staff, 1975) et la classification Française (CPCS, 1967).

2.3.1.1. Les Vertisols dans la classification américaine

Depuis la première version du "Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff, 1975), plusieurs révisions ont été faites sur le document « Keys to Soil Taxonomy » (Soil Survey Staff, 2010). Ces révisions font suite aux recommandations de comités internationaux (ICOMERT). Comme en 1960, le système USDA de la classification des sols se divise en six catégories. Les classes se distinguent en 4 niveaux (Order, Suborder, Great Group et Sub Group).

Des définitions existent pour les niveaux détaillés ("Soil Family" et "Soil Series"). Les classes sont définies en se basant sur des données quantitatives (horizons et propriétés de diagnostiques).

Les critères utilisés pour l'identification des Vertisols dans classification américaine comprennent les trois propriétés suivantes (Soil Survey Staff, 2010) :

- 1- A une certaine profondeur, comprise entre 20 et 100 cm, des faces de glissement (slickensides) suffisamment proches pour se recouper *ou* des agrégats structuraux en fuseaux inclinés (10 à 60 degrés) de l'horizontal; *et*
- 2- Une moyenne pondérée de 30 % ou plus d'argile dans la terre fine soit entre la surface du sol minéral et une profondeur de 18 cm ou soit dans un horizon Ap, selon la profondeur, et 30 % ou plus d'argile dans la terre fine de tous les horizons

entre une profondeur de 18 cm et soit une profondeur de 50 cm ou soit un dense, lithique, para lithique, un duripan, ou d'un horizon pétro calcique si il y a moins de profondeur; et

3- Des fentes de retrait sont ouvertes et fermées périodiquement.

En ce qui concerne les subdivisions, on peut noter que les sous-classes sont basées sur la durée de l'ouverture ou de la fermeture des fentes donc sur le facteur climatique. Ainsi, la classification américaine distingue:

Aquerts : Vertisols qui sont sous des conditions d'hydromorphie depuis quelque temps dans la plupart des années et montrent les caractéristiques d'oxydoréduction, sont regroupées comme « Aquerts ». En raison de la forte teneur en argile, la perméabilité est ralentie et les conditions d'hydromorphie sont susceptibles de se produire. En général, lorsque les précipitations dépassent l'évapotranspiration, les flaques peuvent survenir. Dans des conditions d'une humidité du sol élevée et prolongée dans le temps, le fer et le manganèse sont mobilisés et réduits. Le manganèse peut être en partie responsable de la couleur sombre du profil de sol.

Cryerts : (Non classés comme les Vertisols dans la classification FAO). Ils ont un régime sols à basse température. "Cryerts" sont plus étendus dans les transitions prairies et/ou forêts. On les trouve dans les prairies Canadiennes et à des latitudes similaires en Russie.

Xererts : Dans ces sols, les fentes ne s'ouvrent et ne se renferment qu'une fois pendant 60 jours consécutifs ou plus de 7 fois sur 10 ans. Les températures moyennes annuelles sont inférieures à 22°C et la différence entre les températures moyennes du sol en été et en hiver dans la couche de 50 cm peut dépasser 5 °C.

Torrerts : Généralement secs; les fentes s'ouvrent ou se referment une ou plusieurs fois au cours de l'année; elles ne doivent pas rester fermées pendant plus de 60 jours cumulatifs au cours de l'année.

Usterts : Généralement humides; dans ces sols, les fentes restent ouvertes au moins pendant 90 jours cumulatifs ou plus pendant une année. En plus, les fentes doivent s'ouvrir plus d'une fois au cours de plusieurs années successives et plus d'une fois pendant une année au cours de plusieurs années.

Uderts : Ils ont des fissures qui sont ouvertes au moins 90 jours cumulatifs par an et moins de 60 jours consécutifs pendant l'été. Dans certaines régions, des fissures sont ouvertes uniquement en période de sécheresse. « Uderts » sont de faible étendue dans le monde, étant le plus abondant dans l'Uruguay et l'Argentine orientale, mais aussi dans certaines parties du « Queensland » en Australie et le «Black Belt» du Mississippi et l'Alabama.

D'après ces données les Tirs du Maroc sont à ranger dans le sous-ordre "Xererts".

2.3.1.2. Vertisols dans la classification Française

Selon la classification française (CPCS, 1967), qui est largement utilisée en Afrique francophone, les Vertisols sont les sols à profils A(B)C, A(B)gC ou A(B)Cg, plus ou moins homogénéisés qui sont irrégulièrement différenciés par suite aux mouvements internes, s'exprimant par la présence de larges agrégats gauchis et à faces striées et souvent, par celle d'un microrelief "gilgai". Leurs horizons ne se différencient que par leur structure et ils présentent une structure polyédrique à prismatique grossière et de larges fentes de retrait. Ce sont des sols argileux à dominance d'argile gonflante dont les proportions avoisinent le plus souvent 35-40% et dont la capacité d'échange cationique en moyenne de 35 à 40 cmol(+) kg⁻¹ sol. Leur couleur est en général sombre.

La classe se caractérise donc par la quasi-absence d'horizons due à des mouvements de convection interne liés à la présence d'argiles à fort pouvoir d'expansion qui se gonflent et se rétractent alternativement sous l'action successive de périodes très humides et très sèches.

Les conditions de drainage externe permettent de distinguer deux sous-classes car elles sont en liaison très étroites avec les possibilités de néoformation d'argiles gonflantes sous l'action de la concentration cumulée d'ions Ca et Mg. Par drainage externe, on entend les possibilités d'écoulement de l'eau à la surface du sol. La sous-classe des Vertisols à drainage externe nul ou réduit comprend les Vertisols formés en zones planes ou déprimées et présentant des conditions du système sol-climat très humide pendant de longues périodes.

Tandis que la sous-classe des Vertisols à drainage externe possible contient les sols sur pentes plus ou moins prononcées et toujours riches en argiles du type 2/1 sur les matériaux originaux riches en Ca et en Mg (marnes, roches basiques et ultrabasiques).

Au niveau des groupes, la classification fait intervenir le type d'horizon de surface en distinguant les structures à formes arrondies des structures à angles vifs. Ainsi, on sépare les groupes des Vertisols à structure arrondie, sur au moins les 15 cm supérieurs, des groupes des Vertisols à structure anguleuse sur la même épaisseur. Enfin, au niveau des sous-groupes, on utilise l'intensité du processus fondamental (plus ou moins grande structuration) et/ou des caractères secondaires liés à des actions d'hydromorphie ou de salure.

2.3.1.3. Vertisols dans les deux classifications

D'après ce qui précède, on peut conclure que dans "Soil Taxonomy", c'est la présence de fentes de retraits au cours de l'année et la richesse en minéraux argileux gonflants qui distinguent les Vertisols ainsi que l'existence des autres caractères évoqués plus haut, à savoir le relief de type « gilgai », l'existence de mottes à faces brillantes et striées et/ou des faces de glissement ("slickensides").

Cette classification ne met pas l'accent sur l'état structural des horizons supérieurs. A l'intérieur de cette classe, les subdivisions sont basées sur le degré d'assombrissement des profils, sur le degré de leur coloration et sur le climat.

Par contre la classification française (largement utilisée au Maroc) insiste sur le degré d'homogénéité des profils de couleur sombre. Les horizons ne sont différenciés entre eux que par les caractères des éléments structuraux résultant de larges fentes de retrait qui délimitent les éléments grossiers, de formes polyédriques à prismatiques dans la partie supérieure des profils et à structure tétraédrique "tetrahedral" (agrégats gauchis et à faces striées) dans la partie profonde (Bryssine, 1980).

Le drainage des horizons supérieurs, l'aspect de la structure (formes arrondies ou anguleuses) et le microrelief sont utilisés pour plus de différenciation.

On constate que d'autres caractéristiques ne sont pas prises en compte dans la classification CPCS (1967) des Vertisols telles que la nature de complexe absorbant, l'état de l'oxyde de fer et la présence du calcaire. Cette constatation est assez surprenante quand on sait que ces éléments jouent un rôle important dans les définitions des autres classes de sols.

2.3.2. Typologie des Tirs

Suite à la présentation des Vertisols dans la taxonomie des sols "Soil Taxonomy" et la classification française, il serait judicieux de mettre l'accent sur les Tirs en vue de comparer leurs caractères analytiques avec celles des Vertisols typiques. Les Tirs sont généralement des sols argileux de couleur foncée. La partie supérieure de leurs profils, uniformément colorée, peut atteindre plus d'un mètre. La couleur foncée varie d'un gris clair à un brun sombre en passant par un noir franc. Une autre caractéristique importante des Tirs, c'est leur structure fragmentaire anguleuse. A l'état humide, les Tirs ont une structure fondue massive qui se fissure à sec, ce qui conduit à la formation de prismes de différentes tailles du sol. Ces derniers sont très grossiers, en colonnes massives, à mottes de formes irrégulières et à face rugueuse, dans les Tirs gris. La structure devient plus fine, à formes plus nettes et à faces luisantes dans les Tirs "noirs" et "bruns" (Bryssine, 1971 ; Icole, 1964).

Dans ces derniers, les grosses mottes prismatiques, délimitées par des fentes larges et profondes se fragmentent assez facilement en éléments plus fins, cubiques ou prismatiques, mottes très nettes avec des faces brillantes, aux angles bien prononcés. Dans les horizons profonds, la structure massive en blocs des Tirs gris est gauchit suite à l'intersection des fissures d'orientation verticales et horizontales ou obliques. Ces mottes de formes tétraédriques ont leurs faces luisantes et striées (slickensides).

En profondeur apparaît la roche-mère plus ou moins transformée. Elle peut être tendre comme les limons, les argiles, les marnes ou les produits d'altération de roches éruptives, et en particulier les basaltes, ou dure comme les calcaires encroûtés (Bryssine, 1980).

2.3.2.1. Caractéristiques analytiques des Tirs

Pour comparer les Tirs et leurs caractères analytiques avec les Vertisols typiques, on a procédé à la collecte de données des études faites sur ces sols dans différentes régions du Maroc, notamment dans les régions du Gharb, Zaer et Doukkala. (Tableau 2.3).

➤ **Profondeur des profils**

Dans les régions du Gharb et de Doukkala (régions relativement humides), les Tirs sont généralement des sols profonds formés sur des marnes ou sur des apports alluviaux et colluviaux. Sur marnes, l'épaisseur du profil peut atteindre plusieurs mètres avant de trouver une croûte calcaire ou un horizon sablonneux. De ce fait, le profil peut avoir une granulométrie homogène sur une grande profondeur. Par contre, dans les zones semi-arides des plaines de la Chaouia, on trouve fréquemment des Tirs de faible profondeur développés sur des croûtes lamellaires ou en dalle.

➤ **Composition granulométrique**

La teneur en argile des Tirs varie entre 30 et 55% et peut atteindre environ 80 % au Gharb (Tableau 2.3) car les roches originaires sont des marnes et des schistes très altérés. Les Tirs ont souvent une texture presque homogène de bas en haut avec un léger enrichissement en argile vers la surface. La classe texturale est argileuse à argilo-limoneuse dans les zones d'apports (telle que la zone du Gharb) ou argilo-sableuse dans la zone des Doukkala (Bryssine, 1971). Ainsi l'homogénéité granulométrique des profils des Tirs ne constitue pas un caractère particulier mais un critère spécifique de ces sols. Toutefois, il faut remarquer que dans certains cas on peut observer une fraction de la composition granulométrique due à la nature des dépôts. Le même constat est observé dans les Vertisols

des pays méditerranéens, notamment en Portugal et en Espagne qui ont aussi une composition homogène suivant la profondeur (Tableaux 2.4 et 2.5).

➤ **Minéralogie**

Les travaux menés sur la minéralogie des argiles des Tirs (Hess & Shoen, 1964 ; Deflandre, 1972 ; Badraoui, 1988 ; Badraoui & Bloom, 1990; Moujahid, 2007) ont montré que ses argiles sont souvent riches en smectites bien dans les plaines du Gharb, Saïs, Chaouia que dans le plateau de Doukkala.

➤ **Calcaire**

La teneur en calcaire des Tirs est très variable. Elle peut aller d'un sol uniformément "calcaire" (Tableau 2.3) jusqu'à un sol complètement décalcifié avec une zone d'accumulation en profondeur. Ainsi, dans la région du Gharb, les Tirs jeunes (Tirs gris), développés sur formations récentes, sont calcaires dès la surface. Le taux de carbonates de calcium varie autour de 10 à 20 % sans différenciation notable dans les profils B-151 et B-333 (Tableau 2.3). Les Tirs qui se développent sur les formations plus anciennes sont nettement décalcarisées sur une grande épaisseur avec des niveaux à granules calcaires au dessus de la zone d'accumulation (profils B 152 et Z-1, Tableau 2.3). Un processus analogue s'observe aussi dans d'autres régions du Maroc, en particulier dans les Doukkala, où les Tirs à profil calcaire non différencié occupent le bas-fond des chenaux (profil LR-54, Tableau 2.3). Selon les travaux de Bryssine (1969), la présence d'argile gonflante ne paraît donc pas entraver le développement normal de ce processus de décalcification.

Tab.2.3. Données analytiques de quelques profils types des Tirs au Maroc

Profil	Région	Profondeur	Argile	Limon	Sable	Sable	pH	CaCO3	C	N	CEC	Ca	Mg	Na	K
		(cm)	%	%	fin	Grossier	eau	(%)	(%)	(%)		ech	ech	ech	ech
		cmol (+)/kg sol													
B-151	Tirs gris, Ouled Ameer, Gharb	0-10	65	32	2	1	7,9	15	1,14		38				
		20-70	68	30	1	1	8,1	14	0,94		38				
		70-100	74	25	1	t	7,9	17	0,59		34				
		100 +	72	27	1	t	8,0	17	0,42						
B-333	Tirs près de Moghrane, Gharb	0-10	61	38	t	1	8,0	11	0,98	0,15	28	72	19	7	2
		20-30	77	22	1	t	7,9	13	0,89	0,13	38	67	25	8	2
		30-40	78	20	2	t	8,4	13	0,98	0,14		66	22	6	1
		70-80	82	16	2	t	8,3	11	1,04	0,14	36	55	30	12	2
B-152	Tirs noire de Sidi Slimane, Gharb	2–15	62	18	13	7	8,0	0	0,42		48				
		20-30	60	23	13	4	8,0		0,45		46				
		55-80	66	18	15	1	7,9	3	0,34		39				
		80-110	63	20	16	1	8,0	6	0,25		39				
		110-160	64	20	15	1	8,0	11	0,18		35				
B-331	Tirs noire près de Moghrane, Gharb	0-10	64	21	13	2	7,8	2	1,54	0,15	53	74	22	2	11
		40-50	63	22	13	2	8,2	2	1,01	0,1	54	70	26	3	1
		70-80	62	22	13	3	8,6	1	0,78	0,08	52	60	30	9	1
		110-120	64	22	12	2	8,3	2	0,71	0,12	50	52	34	13	1
		130-140	64	27	6	3	8,2	18	0,56	0,06					
		150-160	56	24	19	1	8,2	45	0						
		170-180	43	38	15	4	8,3	34	0						
B-335	Tirs brun= sol châtain de Sidi Slimane Gharb	0-10	62	18	17	3	7,8	2	0,94			81	16	2	2
		30-40	65	16	17	2	7,6	1	0,93			78	17	2	4
		50-60	67	13	13	7	7,8	1	0,47		42	74	21	3	2
		90-100	60	25	13	2	8,0	2	0,48		40	75	20	3	2
		120-130	58	24	17	1	8,1	11	0,46		30	72	22	4	2
		150-160	46	17	36	1	8,0	21	0,27						
Z-1	Tirs gris Zaer	0-10	40	46	9	5	7,3	1	0,75	0,08	43	67	18	7	8
		10-40	45	43	7	5	7,1	0	0,63	0,06	44	65	25	6	4
		40-80	46	42	7	5	7,2	0	0,5	0,04	41	58	33	5	3
LR-24	Tirs noir grossier, Doukkala	0-10	53	6	32	9	7,6	0	1,25	0,08	39				
		10-50	57	7	26	10	8,1	3	1,06	0,08		88	10	2	
		50-100	59	6	25	10	8,0	3	0,96	0,07	43	76	22	2	
		100-200	59	7	26	8	7,9	7	0,74	0,05	39	62	36	2	
LR-54	Tirs brun gris, Doukkala	0-10	34	12	38	16	7,5	2	1,33	0,17	24	96	1	3	
		10-50	45	13	30	12	7,9	17	0,78	0,08	22	90	8	2	
		50-100	44	13	30	13	8,3	12	0,62	0,07	22	83	16	1	
		100-200	51	19	14	16	8,2	17	0,18	0,04	23	81	17	2	
LZ-18	sol châtain tirsifié, Doukkala	0-10	34	4		62	6,9	0	1,11	0,07					
		10-30	44	4	37	15	7,0	0	1,07	0,09	33	86	2	1	
		30-50	46	5	34	15	7,7	17	0,64	0,08	23	93	6	1	
		50-150	61	4	25	10	7,8	49	0,31	0,03	17	93	5	2	

Le processus d'évolution du calcaire semble débiter dans les Tirs jeunes par sa mise en mouvement et sa concentration sous forme de granules, même si les conditions hydrologiques sont peu favorables à son déplacement et ceci pour deux raisons majeures : la situation topographique et l'âge du sol.

Si on compare ces données avec celles des Vertisols de la région méditerranéenne, on constate que ces sols ont les mêmes caractéristiques que les Tirs du Maroc. En effet, deux profils des "barrus" du Portugal (Tableau 2.4) sont complètement décalcarisés sur une grande profondeur.

Tab.2.4. Caractéristiques physico-chimiques de Vertisols au Portugal

Profil	Description du sol	Profondeur (cm)	Argile %	Limon %	Sable %	pH eau	CaCO ₃ (%)	C (%)	N (%)	CEC	Ca ech.	Mg ech.	Na ech.	K ech.
1-P	Profil noir très décarbonaté "barrus"	0-40	43	19	38	7,8	t	0,95	0,12	21,6	61,1	20,8	4,6	1,4
		40-70	48	17	35	8	t	1,05	0,13	28,8	57,3	31,3	3,5	1
		70-90	41	16	42	8,3	3,1	0,64	0,07	30,7	55,7	34,2	4,1	t
2-P	Profil noir rougeâtre très décarbonaté "barrus"	0-30	61	11	29	7,4	0,9			25,8	76,5	11,6	3,9	t
		30-80	60	25	15	7	0,5			31,1	64,6	20,6	2,2	t

D'après Bryssine (1980)

Par contre, les profils des "terra negra / Andalusia" sont uniformément calcaires dès la surface (Tableau 2.5).

Tab.2.5. Caractéristiques physico-chimiques d'un Vertisol en Espagne

Profil	Description du sol	Profondeur (cm)	Argile %	Limon %	Sable %	pH eau	CaCO3 (%)	C (%)	N (%)	CEC	Ca	Mg	Na	K
											ech.	ech.	ech.	ech.
1-E	Vertisuelo lithomorfo	0-5	53	17	29	7,5	31	0,6	0,1	19	81,5	11,3	6,9	0
		5-35	46	24	29	7,6	31,4	0,5	0,1	19,3	84	10,4	5,5	
		35-70	43	24	32	-	34,2	0,3	0	-	-	-	4	3,2
		70-150	40	24	35	7,7	32,8	0,1	0	17,3	65	17,9	14,5	2,9

D'après Bryssine (1980)

Par ailleurs, le profil de la terre noire de Limagne (France) ressemble étrangement le profil P 151 des Tirs gris du Gharb (Tableau 2.6).

Tab.2.6. Caractéristiques physico-chimiques d'un Vertisol en France

Profil	Description du sol	Profondeur (cm)	Argile %	Limon %	Sable %	pH eau	CaCO ₃ (%)	C (%)	N (%)	CEC cmol (+)/kg sol
1-F	Terre noire de Limagne	0-30	62	24	15	8	16,1	1,9	0,1	49,7
		30-40	54	31	15	8,3	17,4	1,6	0,1	53,2
		40-70	48	40	12		11,7	1,1		
		70-105	52	32	16	8,1	4,4	1,0	0,08	53,4
		105-140	55	25	20		1,6	1,2	0,06	
		140-150	54	22	25		2,1			

D'après Bryssine (1980)

Les Vertisols du Texas (USA) sont complètement décalcifiés (Tableau 2.7) et rappellent les Tirs de Doukkala (LR-24, Tableau 2.3) mais leur teneur élevée en limon les rapproche plutôt des Tirs du Zaer (Z-1, Tableau 2.3).

Tab.2.7. Caractéristiques physico-chimiques de Vertisols en USA

Profil	Région	Profondeur (cm)	Argile %	Limon %	Sable %	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ (%)	CEC cmol(+)/ kg sol	Ca	Mg	Na	K
									ech	ech.	ech.	ech.
									cmol (+)/kg sol			
1-U	Typic chromoxerert, Riverside County, Texas	0-10	27	50	23	7,8		25	17	6	1,9	0
		10--25	37	43	19	7,8		31	20	9	1,2	1
		25-36	40	40	20	8,9	T	32	29	8	0,8	2
		36-61	40	42	18	9,3	4	31	30	8	2,8	1
		61-84	41	40	19	9,3	5	31	31	8	4	1
		84-135	44	41	15	9	4	37	34	9	5,9	1
		135-150	47	45	8	8,7	2	48	42	13	8,1	1
		150-170	47	45	8	8,7	1	53	51	14	8,6	1
		170-185	35	44	21	8,7	T	59	47	15	8,8	1
2-U	Udic Pellustert, Collin County, Texas	0-15	36	41	23	6,4	T	27	23	4	0,3	1
		15-56	44	39	17	6,3	T	32	27	5	1,4	1
		56-84	45	39	16	6,6	T	33	28	5	2,6	1
		84-125	45	39	16	7,7	T	32	25	4	3,7	1
		125-165	48	38	14	7,6	1	32	26	4	4,2	1
		165-200	50	35	15	7,7	1	31	26	4	4,5	1
		200-245	50	33	17	7,8	4	28	25	4	4,5	1

D'après Soil Survey Staff (1975)

Étant donné que ces Vertisols se trouvent sous un climat semi-aride à subhumide, ils se sont enrichis par illuviation car ils sont souvent mal drainés. C'est pour cette raison que leur pH est élevé, dépassant parfois 8 avec une présence de CaCO₃ dès la surface et s'accumulent en profondeur (profils 2-Su et 4-Ni, Tableau 2.8). Cependant, des Vertisols acides sont aussi présents avec un pH inférieur à 6 (Profil 1-Et, Tableau 2.8) et une saturation élevée en Mg (Ahmad, 1983). Le profil du Tirs du Gharb (B-331, Tableau 2.3)

ressemble relativement au profil du Vertisol du Soudan (2-Su, Tableau 2.8) alors que celui du Nigéria (4-Ni, Tableau 2.8) est presque similaire au profil du Tirs (B-152, Tableau 2.3) du Gharb.

➤ La matière organique

La teneur en matière organique dans les Tirs est, généralement, inférieure à 2% comme dans la majorité des sols Marocains (Naman et al., 2001).

Sa répartition dans les profils des Tirs peut donner lieu aux remarques suivantes.

- ✓ Dans les sols pauvres en humus, le taux de la matière organique reste assez constant dans toute la masse du sol, tout en diminuant légèrement avec la profondeur (profils B-152 et Z-1, Tableau 2.3).
- ✓ Dans les sols riches en humus, on assiste à une stratification de la matière organique et son taux diminue rapidement et régulièrement du sommet à la base des profils (profils B-151, B-331 et LZ-18, Tableau 2.3).

Le même phénomène peut être observé dans les Vertisols du bassin Méditerranéen. Au premier groupe (Isohumique) appartiennent les profils 1-P en Portugal (Tableau 2.4) et 1-E en Espagne (Tableau 2.5) et au second groupe correspond le profil 1-F en France (Tableau 2.6).

Le rapport C/N varie d'une manière générale autour de 10 dans les Tirs Marocains. Il serait plus bas comme dans les sols de la Péninsule Ibérique et plus élevé comme dans les sols de France (Tableau 2.6).

Tab.2.8. Caractéristiques physico-chimiques de Vertisols en Afrique

Profil	Région	Profondeur (cm)	Argile %	Limon %	Sable %	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ (%)	CEC cmol(+)/ kg sol	Ca	Mg	Na	K
									Ech	ech	ech	ech
									cmol (+)/kg sol			
1-Et	Typic Chromustert, Holetta, Ethiopia	0-15	31	41	28	5,7		55	17	17		2,2
		15-45	51	33	16	5,2		49	18	18		0,68
		45-75	67	21	12	6,6		49	26	11		1,2
		75-160	73	11	16	7,1		66	37	15		1,92
		160-190	71	17	12	7,6		66	44	15		0,92
2-Su	Dinder series typic Chromustert, Dinder, Kenana and Mazmurares, Sudan	0-3	75	20	4	7,2	1,1	84			0,9	1
		3-20	66	28	5	7,6	2,1	87			1,6	0,8
		20-45	73	21	5	8,4	1,8	84			3	0,8
		45-80	75	20	4	8,3	1,8	83			6	0,5
		80-120	77	19	3	8	1,2	83			7,5	0,8
		120-145	77	19	3	8,5	1,8	75			8,9	0,5
		145-185	77	18	4	7,9	3,1	84			8,7	0,5
3-Zi	Entic Pellustert, Chisumbanje, Zimbabwe	0-10	62	23	15	7,5	0,1	86	52	40	0,7	1,73
		12-27	67	13	20	7,6	0,1	92	50	42	1,37	1,32
		30-45	72	11	17	7,7	0,1	85	46	45	2,41	1,23
		60-75	75	11	15	7,8	0,1	95	46	48	4,26	1,23
		95-110	79	8	14	7,8	0,1	96	45	50	5,72	1,29
4-Ni	Typic Pellustert, Ngala, Nigeria	0-40	68	16	16	8,2	5,5	47	16	5	4,1	0,9
		40-103	76	10	14	8,6	6	52	18	5	7,8	1
		136-175	74	3	23	9,3	4,5	67	24	13	1,1	0,2

D'après Ahmad (1996)

➤ La coloration

Dans les Vertisols, l'intensité de la couleur noire n'est pas en rapport avec la teneur en matière organique. C'est le complexe argileux humique qui explique l'intensité de la couleur noire (Dudal & Eswaran, 1988). L'oxydation de la matière organique par le peroxyde d'hydrogène donne à la couleur du sol une teinte moins foncée. Pour les Tirs, la coloration est de nuances jaunâtres (Tableau 2.9) suivant les indications du code de Munsell et la "hue" varie de 5 Y à 10 YR. Pour les Tirs bruns, les valeurs de "hue", se retrouvent dans la planche de 7,5 YR.

D'après Bryssine (1980), on assiste à deux processus parallèles de l'évolution de la coloration des Tirs :

- augmentation du degré de contraste progressivement rougeâtre qui affecte surtout les horizons supérieurs des Tirs du Gharb ; *et*
- tirsification par la présence d'une coloration jaunâtre au niveau des horizons supérieurs dans les Tirs de Doukkala.

Il est à remarquer que la brillance des couleurs de ces sols est liée aussi à l'existence des surfaces lustrées dans les horizons profonds à structure angulaire (prismatique, cubique, plane ou tétraédrique) prononcée. Une telle structure est bien visible dans les Tirs noirs. Par contre, la brillance n'existe ni dans les horizons supérieurs de ces sols ni dans les horizons profonds des Tirs gris .

➤ **Le complexe absorbant**

La capacité d'échange des cations basiques des Tirs serait de l'ordre de 40 cmol (+)/kg du sol avec de variations notables suivant les profils (Deflandre, 1972).

Si l'on admet que la capacité d'échange de la montmorillonite pure est égale à (60 cmol (+)/kg sol), ce chiffre de (40 cmol(+)/kg sol) serait relativement modéré pour les sols dont le taux d'argile peut atteindre 70 % (profile B-333 du Gharb dans le Tableau 2.10).

D'après les travaux de Miége (1956) et de Bryssine (1980), cette capacité d'échange est due, surtout dans les Tirs, à la fraction minérale. La part réservée à la fraction organique était très faible (de l'ordre de 1 à 2 cmol (+)/kg du sol).

Dans les Tirs, le complexe absorbant est saturé en cations basiques, le calcium étant le cation prédominant (profils LR-54 et LZ-18, Tableau 2.3) et le taux de magnésium

échangeable est relativement élevé surtout dans les horizons profonds (profils B-333 et B-331, Tableau 2.3).

Tab.2.9. Coloration de profils de Vertisols

Pays	Profil.	Profondeur Cm	Munsell		
			Hue	u	V / C
Tirs du Maroc Plaine du Gharb.	B – 153	0-15	10	YR	3/3
		65-73			4/3
		> 90			5/4
	B - 335	0-10	7,5	YR	3/2
	B - 155	0-12	5	YR	3/3
		60-90		YR	4/4
		>90			5/4
Vertisol- Espagne	3 - E	0-5	5	Y	6/3
		35-70			5/2
		70-150	2,5		5/3
		> 150	10	YR	6/6
Vertisol- USA	10 - USA	0-15	5	Y	3/1
		125-165			4/3
		165-200			4/1

D'après Bryssine (1980)

Les mêmes caractères du complexe absorbant (prédominance du calcium parmi les cations basiques, échangeables, accroissement fréquent du magnésium avec la profondeur) se retrouvent dans les autres sols de la même catégorie (profils de la Péninsule Ibérique, des USA et de Nigéria) alors que dans les profils de l’Ethiopie et du Zimbabwe, le taux des cations Ca et Mg sont plutôt identiques (Tableau 2.8),

Les valeurs de la saturation en cations basiques, sont aussi très variables, oscillant entre 40 à plus de 100 % et la capacité d'échange des sols des USA et de la France (Ahmad, 1996) se rapproche des chiffres observés dans les Tirs du Maroc (Bryssine, 1980).

➤ **Le pH des Tirs**

Le pH des Tirs calcaires est basique dès la surface et il augmente avec la profondeur (B-154 et B-333, Tableau 2.3). Dans les Tirs décalcarisés (Z-1 et LZ-18, Tableau 2.3) le pH est presque neutre.

Contrairement au Tirs, les Vertisols d'autres pays ont un éventail du pH plus large et la répartition de ses valeurs dans les profils est plus étalée. Ainsi, certains Vertisols des USA (Tableau 2.7) et d'Ethiopie (Tableau 2.8) sont acides. On remarque que les sols de la Péninsule Ibérique qui se rapprochent des Tirs marocains, paraissent moins acides.

➤ **Phase liquide**

D'après les études de Bryssine (1980) sur les Tirs du Gharb, la capacité de rétention gravimétrique (31 à 33 %), déterminée par la méthode de Bouyoucous, apparaît supérieure à l'humidité de la terre (25 à 27 %) mesurée sur le terrain. Ceci a été confirmé par les travaux de Bouma (1983) qui a montré que les méthodes classiques de Bouyoucous et de Richards ne sont pas adéquates pour les Vertisols qui suivent un régime de flux différentiel "by-pass flux" et que pour tenir compte des macropores il faut utiliser de grands échantillons. On note, par ailleurs que la perméabilité des Tirs est généralement faible à l'état humide (ne dépasse pas 30 %) mais augmente considérablement à l'état sec, surtout dans la partie au dessus des fentes (Mrabet, 1989).

Par ailleurs, dans les Vertisols, la conductivité hydraulique saturée dépend de la structure des sols, la présence de l'air entre les agrégats (Constanz et al., 1988 ; Faybihenko, 1995) et la concentration des sels (Bouma & Loveday, 1988).

Comme les autres Vertisols du Monde, les Tirs ne retiennent en réalité que relativement peu d'eau. Ainsi, la capacité au champ mesurée varie pour les Tirs du Gharb de 40 % à $pF = 2.5$, taux que l'on n'observe réellement que très rarement au cours de l'année dans les profils non irrigués. Pour l'humidité au point de flétrissement, elle est de l'ordre de 17% à $pF = 4.2$ (Bryssine, 1971).

Les Tirs secs absorbent énergiquement l'eau de pluie ou d'irrigation qui désagrège les mottes sèches. Au début d'humidification l'imbibition du sol est rapide. La pénétration de l'eau diminue ensuite sensiblement sans toutefois s'arrêter à l'intérieur de la masse terreuse humide et l'eau ne paraît pas mouiller la masse entière du sol mais elle entoure préférentiellement les agrégats argileux d'un film continu d'eau. Ce dernier est apparemment faiblement fixé à ces grains malgré leur haute teneur en argile (Bryssine, 1980).

L'eau retenue dans la masse terreuse peut descendre en profondeur si l'humidité des sols dépasse leur capacité au champ. Toutefois, quand les Tirs sont humides l'infiltration est lente. Elle se poursuit très longtemps après l'arrêt des pluies au cours du printemps et du début de l'été, même quand les horizons supérieurs commencent à se dessécher sous l'effet de l'évaporation. Ces sols restent donc longtemps humides alors que les autres types subissent déjà un dessèchement profond. L'un des pionniers pédologues du Maroc, Del Villar (1953) a nommé ce processus dans les Tirs comme un régime "aéro-hydropédique". La fréquence des pluies durant l'année joue un rôle considérable dans le régime hydrique de ces sols. Le drainage effectif des Tirs a lieu pendant les périodes hivernales sans pluies.

Pendant la période estivale ces sols se comportent comme des sols sableux perdant vite leur eau entre deux irrigations, la masse argileuse de "grains" n'étant que faiblement humidifiée. Par contre l'humidification du profil est plus profonde (Bryssine, 1980).

2.3.2.2. Structure du sol

La structure des Tirs constitue un élément essentiel dans leur classification pédologique. Elle est grenue dans l'horizon superficiel, prismatique plus ou moins développée dans l'horizon sous-jacent, tétraédrique avec des faces de glissement lustrées en profondeur. Ces caractères s'observent dans les sols secs. Or, comme dans tous les sols du Maroc, l'état structural des Tirs dépend de leur état hydrique et les processus de la pédogénèse interne ne peuvent se manifester qu'en présence d'eau.

Plusieurs auteurs ont décrit l'état structural des Tirs humides, le changement occasionné par leur dessiccation, et aussi leur état structural à l'état sec (Bryssine, 1971 ; 1980 ; Icole, 1964 ; Miége, 1956).

➤ Structure des sols humides

Les éléments de base de la structure des Tirs semblent être constitués par des '*grains*' argileux, bien visibles dans les sols humides. Ces assemblages terreux sont très stables. Une agitation mécanique de longue durée dans l'eau (30 à 60 min) ne semble pas les désagréger complètement. On obtient à la fin de l'opération des fractions limoneuses provenant de l'arrachage des particules de terre de la surface des grains au cours de leur agitation. La présence des cations basiques (Ca, Mg) ne provoque pas non plus la dispersion physico-chimique de ces grains. Il faut élever la réaction du sol au pH 9 à 10 pour assister à un début de dispersion. Cet accroissement du pH est difficile à obtenir dans ces sols fortement tamponnés. Comme il a été souligné dans le paragraphe précédent, l'eau du sol se localise de préférence entre ces grains, ceux-ci étant plus secs

(humides seulement) pendant la saison pluvieuse que la masse totale du sol « mouillé ». Les fissures qui séparent ces grains sont très fines; leur largeur serait de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres (Mrabet, 1989). L'eau serait donc retenue dans ces interstices par des forces capillaires agissant depuis la surface des 'grains'. Au-delà de 25% d'humidité (limite inférieure de plasticité) et jusqu'à la capacité de rétention maximale (porosité totale), le sol humide se trouve à l'état plastique (Bryssine, 1971).

➤ **Structure des sols secs**

A l'état sec, les profils des Tirs comprennent plusieurs horizons structuraux bien différenciés. L'horizon supérieur, de quelques centimètres d'épaisseur possède une structure motteuse, fragmentaire et fine (grenue).

En dessous, se trouve un horizon de plusieurs décimètres d'épaisseur, à structure fragmentaire grossière allant de la structure fondue massive, fissurée en grand bloc à une structure prismatique grossière en passant par une structure motteuse fragmentaire et prismatique, à formes nettes. Les mottes grossières de la partie supérieure de l'horizon ont des faces rugueuses, surtout dans le cas d'une structure fondue massive. Ces faces deviennent lisses et lustrées vers la profondeur.

Plus bas, on passe à une structure fragmentaire tétraédrique, gauchie, à faces lisses et striées, formée par l'intersection de fentes obliques, bien conservables. En général, les mottes tétraédriques sont grossières, mais parfois elles se devisent en éléments plus fins de même forme ou en plaquettes gauchies. Cette structure peut se développer sur une grande épaisseur.

Cette structure particulière des sols secs existe également dans les sols humides. Ainsi, on peut observer des fissures qui correspondent aux fentes de dessiccation et qui parcourent

les horizons prismatiques des sols humides. Dans ces horizons, l'eau peut circuler librement sous forme d'eau de gravité entre les mottes qui restent dures et compactes même humides.

➤ ***Dynamique de la structure***

La dynamique de la structure des Tirs, telle qu'elle a été décrite par Bryssine (1971) est similaire à celle des autres Vertisols présentée par Dudal & Eswaran (1988). En effet, la structure de ces sols est relative à la teneur en eau des horizons. Afin de mieux l'apprécier, il est nécessaire de faire des observations à différentes humectations. La figure 2.1 montre la variabilité de la structure dans un profil type en tenant compte de sa pédogenèse (Dudal & Eswaran, 1988).

- **Zone 1** : la profondeur de cette zone commence de la surface jusqu'à 25 cm. Elle subit des alternances fréquentes d'humidification et de dessiccation (influence du climat et du sol) et elle se fragmente sous forme de prismes à l'état sec.
- **Zone 2** : dans cette zone, les fissures pénètrent verticalement en contribuant à isoler les gros prismes. Ces derniers donnent naissance à des mottes polyédriques moyennes.
- **Zone 3** : la profondeur de cet horizon est variable de 10 à 100 cm. Le sol reste humide plus longtemps et subit la pression des horizons sus-jacents. Ceci induit la formation des agrégats (lenticilles) à disposition horizontale.
- **Zone 4** : cette zone n'est pas assez humide pour être plastique et la structure lenticulaire se résout en une structure massive donnant des polyédres (slickensides) qui gardent une tendance inclinée et feuilletée (Dudal & Eswaran, 1988). La longueur de cette zone peut varier de 50 à 125 cm et cette structure massive

s'observe quand la masse est argileuse de 35 à 40 % et elle résulte directement de ce qu' on pourrait appeler une endohydromorphie due à la forte rétention d'eau par ces argiles.

- **Zone 5** . cette zone argileuse est sous-jacente à la zone 4 ou parfois directement à la zone 3. Elle a une structure massive avec la présence fréquente du gypse et du carbonate.

Dans les Vertisols, la macroporosité totale est élevée (la présence des fentes de retraits) et diminue en profondeur au profit de la microporosité qui domine à l'état humide. En effet, à sec, les mottes sont dures et compactes et elles se dégradent pour donner l'aspect fondu (Dudal & Eswaran, 1988 ; Radford et al., 2000).

Les mêmes caractéristiques s'observent dans les Tirs. En effet, malgré leur haute teneur en fractions argileuses, ces sols sont très poreux, leur porosité totale variant de 60% en volume dans les horizons supérieurs à 40-45% en profondeur. Les mottes sèches sont extrêmement compactes avec une densité apparente des mottes oscillant autour de 1,6 g.cm⁻³. Elle serait de l'ordre de 1,4 g.cm⁻³ dans les sols humides (Bryssine, 1971 ; Mrabet, 1989).

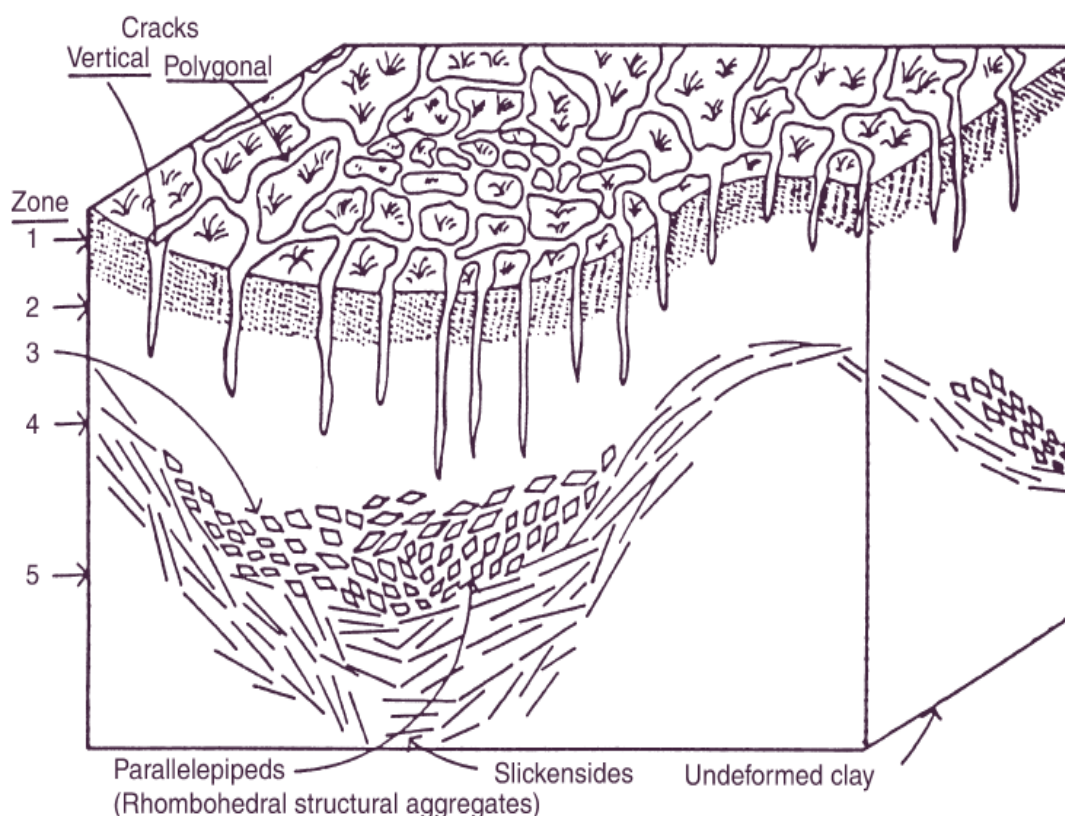


Fig.2.1. Les horizons d'un profil type du Vertisol (Dudal & Eswaran, 1988)

2.3.2.3. Formation de l'horizon vertique ou tirsification

Selon Eswaran et al. (1988), les minéraux argileux nécessitent des conditions spéciales pour leur formation. Les argiles gonflantes (smectites) se présentent dans des solutions riches en Si et Mg. Ainsi, la tirsification a lieu dans les régions semi-arides souvent dans des dépressions où l'eau infiltré est riche en silice (Hess & Shoen, 1964; Wilbert, 1965; Bryssine, 1971).

Les conditions favorables à la formation du matériel parental des smectites nécessaires à ces sols sont :

- ✓ assez d'eau pour permettre l'humidification mais pas la lixiviation ; et

- ✓ une période sèche pour la cristallisation des minéraux argileux ; et
- ✓ une température assez élevée pour favoriser la pédogenèse.

Dans ces conditions, les smectites se forment en présence de silice et cations (comme Ca et Mg) si le pH du sol est neutre. Quand la surface du sol se dessèche, les premières fentes à une dimension se créent. Une alternance des conditions humides et sèches implique que le sol perd sa plasticité et d'autres fentes de retraits se créent en profondeur.

2.4. Distribution des Tirs au Maroc

Plusieurs pédologues (Del Villar, 1953 ; Wilbert, 1965 ; Watteau, 1967 ; Bryssine, 1971) ont essayé de dresser la répartition géographique des Tirs au Maroc. Ils se localisent souvent dans les plaines et les plateaux des versants atlantiques à Doukkala, Chaouia, Zaer, Gharb, Loukkous, Tanger, Pré-Rif, Saïs, Tadla et Haouz. D'après une ancienne estimation de Wilbert en 1965, la superficie des sols tirsifiés au Maroc était de 0,2 M ha (million d'hectares), mais cette estimation s'est avérée en dessous de la réalité. En effet, la consultation d'environ 6,5 M ha d'études pédologiques, réalisées durant les dernières décennies à différentes échelles (1/20.000, 1/50.000 et 1/100.000), nous a permis d'estimer cette superficie à 0,9 M ha répartie sur plusieurs régions du Maroc (Fig. 2.2).

Les caractères communs de ces régions est la présence d'une proportion minimale de montmorillonite dans une argile abondante et la présence de l'ion calcaire en abondance.

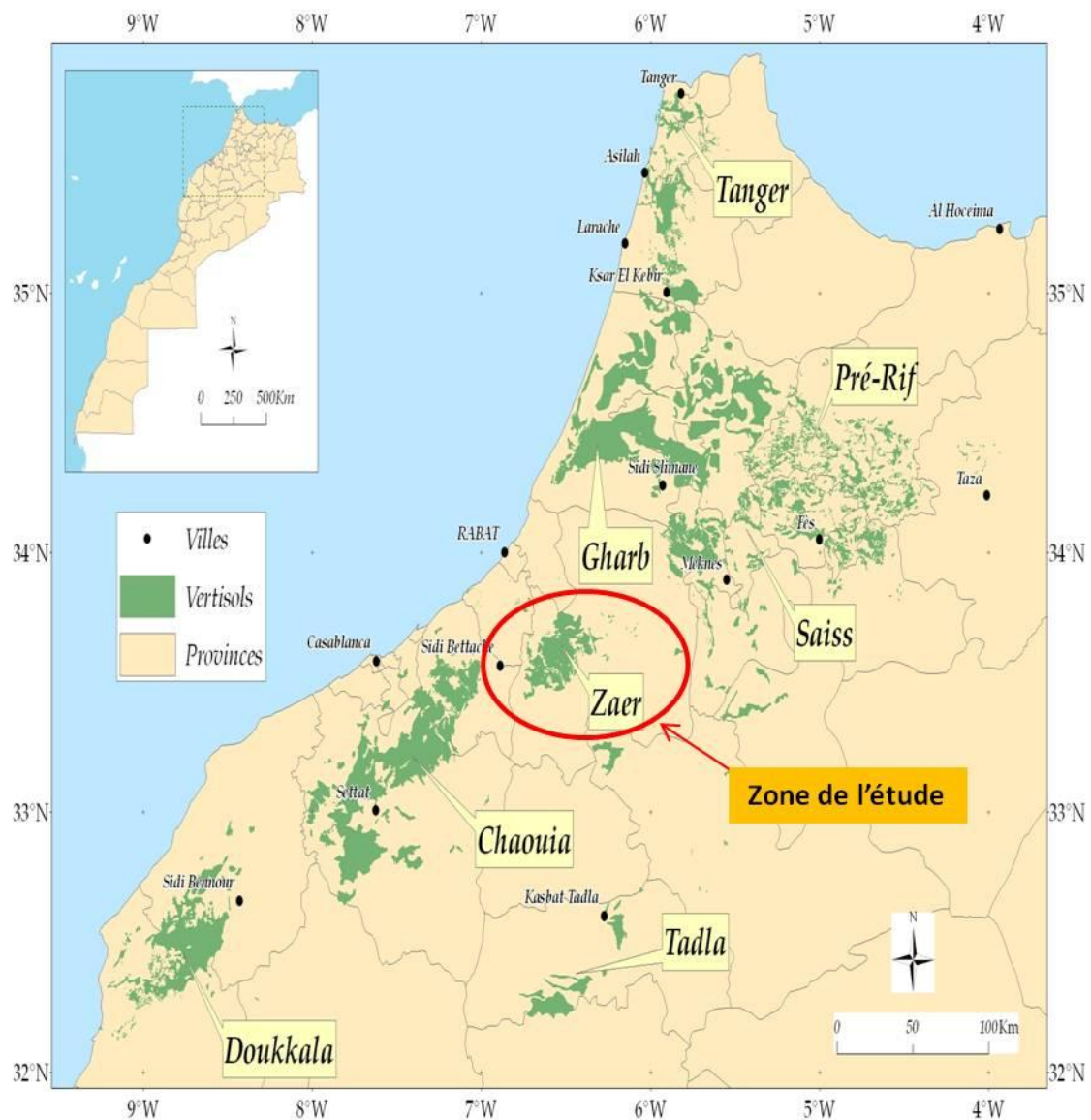


Fig.2.2. Carte de la répartition des Tirs au Maroc

Le climat intervient pour expliquer le degré de tirsification des profils. En effet, la plus grande partie des Tirs se trouve dans la bande littorale large de 70 km, à forte hygrométrie.

✎ **Doukkala.** C'est la région la plus méridionale qui a une grande surface tirsifiée. La topographie intervient dans la répartition puisque la tirsification la plus nette se limite dans

les dépressions ou les zones basses ainsi qu'au pied de la falaise du grand piémont des « Mouissates » près de « Youssoufia ».

✎ **Basse Chaouia.** Elle est comparable à la plaine des Doukkala mais sous une pluviométrie plus faible (300 mm). Dans cette zone, il existe toute une gamme de Tirs sur croûte dont l'épaisseur peut varier autour de 40 à 50 cm. Les tirs profonds se trouvent à droite et à gauche de l'Oued Malleh. Tous ces Tirs sont généralement de couleur moins foncée (Fig.2.3 ; P3 en annexe) et quand la croûte remonte vers la surface, la couleur est plutôt brune noirâtre suite à la déshydratation des oxydes de fer (rubéfaction) (Icole, 1964).

✎ **Zaer.** Cette région est une grande plaine agricole et dans la zone de Rommani, se trouve une grande tâche de Tirs (voir profile type en Fig.2.3b ; P2 en annexe). Une autre tâche continue se trouve dans la région comprise entre les Oueds Malleh et Cherrat (Wilbert, 1965).

✎ **Gharb.** C'est la région typique des Tirs. Son type est très différent des trois régions précédentes constituées surtout par des plateaux. Le Gharb, en effet, est une vaste zone plus ou moins plaine suivant les endroits et suivant les époques du Quaternaire. Les alluvions déposées dans cette plaine en provenance du Rif et du Pré Rif par le canal de l'Oued Ouergha et du Moyens Atlas par celui de Sebou, et enfin des basaltes de la région d'Azrou par celui de l'Oued Beht, ont accumulé des quantités énormes de sédiments argileux riches en argiles gonflantes. Ce milieu est fréquemment semi-hydromorphe, soit à cause des inondations, soit à cause des marais, soit à cause de la nappe phréatique peu profonde. Les Tirs de cette zone sont généralement profonds, très argileux, de couleur très foncée (Fig.2.3a ; P1 en annexe), mais ils ont de comportement agronomique différent suivant les origines et les substratums (Bryssine, 1971).

➤ **Tadla et Haouz.** La plaine de Tadla est trop sèche pour donner naissance à de vrais sols tirsifiés. Mais le piémont de l'Atlas accroche de la pluie et reçoit des épandages qui permettent localement des extensions de sols tirsifiés (Fig.2.3d).

Le cas du Haouz de Marrakech a été étudié par Mahler (1959). Ce sont les dépressions situées entre les grands cônes de déjection des Oueds venant de l'Atlas qui concentrent des eaux abondantes et provoquent une tirsification.

2.5. Facteurs de formation des Tirs

Les Tirs du Maroc ont des conditions de pédogenèse similaires aux conditions de formation des Vertisols (Bryssine, 1980).

2.5.1. Climat

Selon Wilbert (1965), les sols tirsifiés au Maroc se trouvent sur une grande gamme de conditions climatiques et de situations topographiques (Tableau 2.10). Une seule caractéristique en commun, la roche-mère doit fournir l'ion Ca^{2+} . Ainsi on peut dire que tous les sols tirsifiés se sont développés sur une roche-mère à argiles gonflantes et en présence de l'ion Ca^{2+} , de préférence fourni par le calcaire. Les conditions climatiques Méditerranéennes, comme l'Espagne, le Portugal ou l'Australie (Queensland), telles qu'elles sont décrites par Ahmad (1996), sont très proches de celles du Maroc, surtout de sa partie nord, à une différence près que la saison estivale y est moins sèche

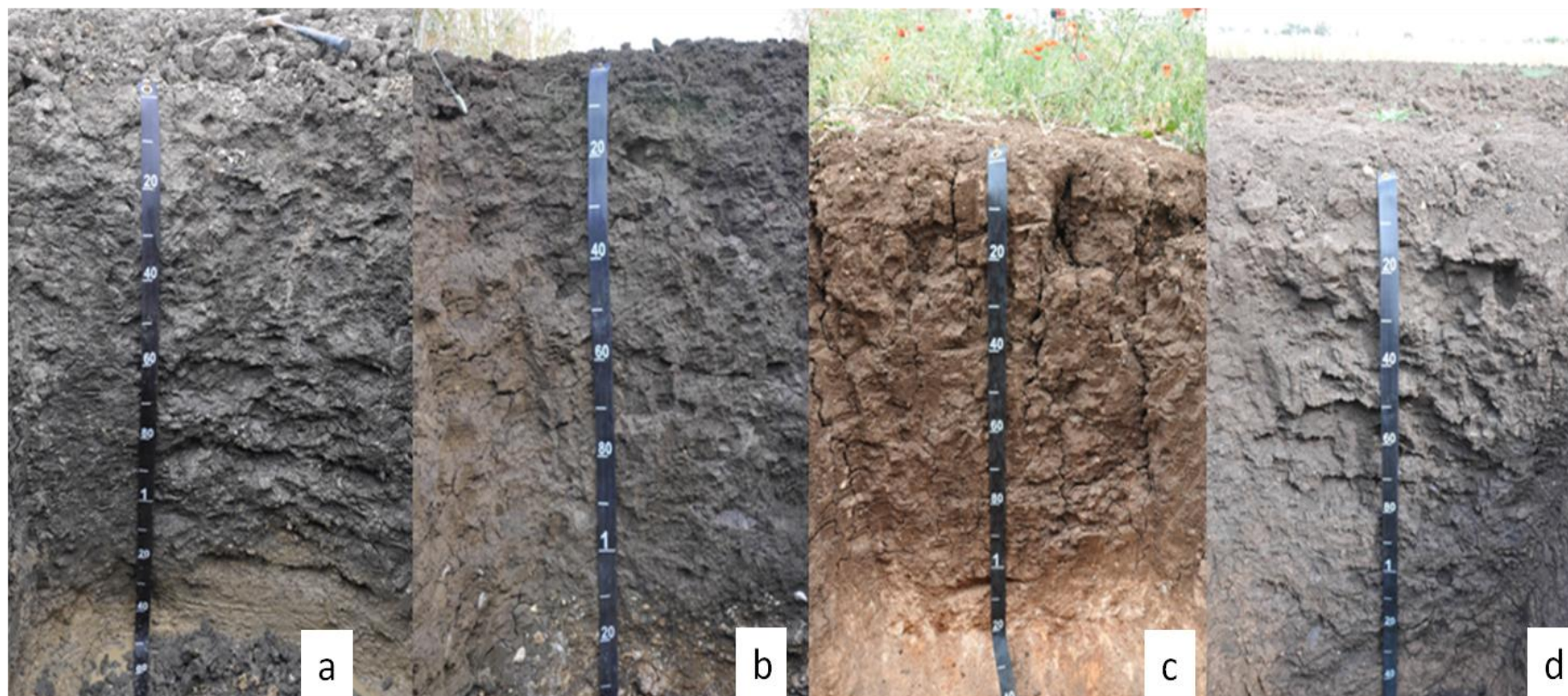


Fig.2.3. Quelques profils de Vertisols (Tirs) à travers les régions du Maroc (Gharb (a), Zaer (b), Chaouia (c) et Tadla (d))

Tab.2.10. Répartition des Tirs en fonction du climat et de la topographie

Région	Topographie	Précipitation annuelle (mm)									
		300	350	400	450	500	550	600	650	700	800
RIF	Vallée, coteaux										
PRERIF	Vallée, coteaux										
GHARB	Vallée										
SAIS	Vallée										
ZAER	Plateau										
CHAOUIA	Plateau, Vallée										
DOUKKALA	Plateau, Vallée										
TADLA	Plateau										
HAOUZ	Plateau										

2.5.2. Végétation

La relation entre les Tirs et leurs végétations naturelles n'a pas été étudiée d'une façon particulière jusqu'à nos jours malgré tout l'intérêt qu'elle présente. A l'heure actuelle, les Tirs des plaines et des plateaux du Maroc Atlantique fortement cultivés, surtout depuis ces dernières années, se développent sous une végétation herbacée, naturelle ou cultivée, dans des conditions se rapprochant du régime steppique (Bryssine, 1980). Enfin, aux Etats-Unis, la végétation des Vertisols non cultivés est normalement herbacée et annuelle. Toutefois, des plantes arbustives dispersées, résistantes à la sécheresse, peuvent s'y trouver (Coulombe et al., 1996).

2.5.3. Relief

D'une manière générale, les Tirs se développent, comme la pluparts des Vertisols, dans les endroits humides mais non mouillés. Ainsi dans les plaines et sur les plateaux du Maroc Atlantique, les Tirs occupent les terrains plats ou les dépressions en passant aux sols à régime aéro-hydropédique sur les pentes assez accusées des croupes (variables suivant la nature des

roches sous jacentes) et aux sols hydromorphes dans les milieux confinés et non drainés (Bryssine, 1980).

Dans les collines marneuses du Pré-Rif, ils se cantonnent sur les parties inférieures des pentes, les sommets des collines étant occupés par les Rendzines tandis que les bas-fonds sont couverts par les sols plus ou moins hydromorphes ou d'apport récent (nommés localement 'Dehs').

Dans la Péninsule Ibérique les auteurs espagnols distinguent les Vertisols topomorphes situés dans les basses plaines des Vertisols lithomorphes qui se développent surtout sur les collines marneuses à pentes douces, en particulier dans la région de Cordoba (Ahmad, 1996).

2.5.4. Roches-mères

Les Tirs se forment sur les roches ou sur les produits de leur altération riches en argile à montmorillonite. C'est le cas, par exemple, des marnes Miocènes et Eocènes du Pré-Rif, des produits d'altération des basaltes et des limons superficiels couvrant les plaines et les plateaux du Maroc Atlantique. On ne rencontre pas, par contre, de Tirs sur les formations Villafranchiennes; ces dernières étant très riches en kaolinite (Badraoui, 1988). C'est sur les roches similaires que se développent les Vertisols de la Péninsules Ibérique et des USA (Coulombe et al., 1996).

2.5.5. Eaux superficielles

Les Tirs ne se forment pas dans les bas-fonds recouverts d'eau pendant longtemps, comme les régions côtières du Gharb. Par contre, ils sont présents sur leurs pourtours et commencent à se développer dans leur partie centrale après leur assainissement (Bryssine, 1980). Toutefois, les dépressions où les eaux de surface ne séjournent pas longtemps et s'infiltrant assez rapidement, sont généralement tirsifiées. Il en résulte que la présence d'eau à la surface du sol pendant toute la période humide de l'année jusqu'à la fin du printemps, empêche la

formation des Tirs alors que l'humidification progressive du sol par l'infiltration assez rapide de l'eau de surface paraît créer les conditions favorables à leur formation. Ceci est similaire aux conditions décrites par Coulombe et al. (1996) pour la pédogenèse des Vertisols du Texas aux Etats-Unis.

2.5.6. Eaux souterraines

Dans les zones de développement des Tirs on n'observe pas la présence de nappes souterraines proches de la surface du sol. Dans le cas de l'existence d'une telle zone phréatique, son effet sur la dynamique des profils semble être réduit. Cette constatation est observée aussi dans les autres Vertisols du monde (Ahmad, 1996) et pourrait être expliquée par la structure spéciale de ces terres durant la saison humide, faite de la juxtaposition des grains argileux de taille moyenne oscillant autour de 1 mm. Une telle texture grossière ne facilite pas la remontée capillaire, ce qui explique d'ailleurs la faible salinisation de ces sols.

La nappe souterraine ne paraît pas non plus exister dans les autres Vertisols des Etats-Unis ou de la Péninsule Ibérique, ni dans les "Vertisols topomorphes" de la région Sud d'Espagne et d'autres Vertisols (Ahmad, 1996).

2.5.7. Age du sol

Ce facteur de la pédogénèse paraît intervenir d'une manière décisive dans le façonnement des profils des Tirs et leurs caractères apparemment particuliers semblent se développer avec le temps. Ainsi, dans le Gharb ou Zaer, les sols jeunes, Tirs gris, sur les formations rharbiennes, équivalent de l'Holocène récent (Biberson, 1971) ont des profils assez uniformes, peu colorés, à profils calcaires non différenciés, à structure très grossière, peu nette et uniforme. La surface des mottes est rugueuse et les faces lustrées sont peu ou non développées.

Les Tirs noirs qui évoluent sur les apports plus anciens, 'Soltaniens' (Quaternaire récent), sont nettement différenciés. Souvent ils sont complètement décalcarisés jusqu'à une certaine

profondeur (plus d'un mètre). Leur coloration est souvent intense et ils acquièrent des nuances sombres. Cette évolution paraît aboutir aux Tirs bruns où les caractères structuraux sont bien prononcés. La masse du sol se colore nettement de nuances rouges dans le Gharb, c'est apparemment le stade ultime de leur développement; comme les sols à régime aéro-hydropédique ils passent alors aux sols châtaîns (Bryssine, 1980).

L'évolution des Tirs décrite précédemment peut expliquer le fait que dans beaucoup de régions du Maroc, les types de sol correspondent aux différentes formations du Quaternaire. Tirs sur les dépôts 'Rharbiens' et sols châtaîns sur les dépôts 'Soltaniens'. Il en est résulté cette confusion selon laquelle chaque type de sol correspond à une époque déterminée; celle de la tirsification et celle de la rubéfaction (Bryssine, 1980). En réalité, il s'agirait ici d'un processus de longue durée qui a permis l'évolution en divers stades des dépôts fortement argileux : Tirs d'abord et sols châtaîns ensuite.

2.5.8. Action anthropogène

Selon les travaux de Bryssine (1980), l'étude du changement du régime hydrique du Tirs a montré que la mise en culture, avec du labour intensif, se traduit par leur tassement progressif dû à la diminution de la porosité de la masse du sol (surtout de sa macroporosité très élevée au début) et par l'augmentation de leur compacité par accroissement de la porosité fine au dépend de la porosité grossière. Ces changements de la porosité affectent surtout les horizons profonds, la surface se modifiant relativement peu. La diminution de la porosité totale (tassement du sol) et l'accroissement de la compacité semble être en relation avec l'amenuisement de la microstructure du sol. Toutefois ces variations des caractères de la microstructure sont plus importantes en surface qu'en profondeur. Ces deux phénomènes, l'amenuisement de la microstructure et modification de la porosité (tassement du sol et augmentation de la compacité) ont provoqué, semble-t-il, le grossissement de la macrostructure qui se traduit par l'accroissement du diamètre des mottes qui deviennent en

même temps moins poreuses et plus compactes. De plus leur aptitude au foisonnement au cours de l'humidification et au retrait au cours de la dessiccation, faible au début, est devenue plus importante.

2.5.9. Les relations spatio-temporelles avec d'autres sols

D'autres types de sols présentent une ou l'autre de ces propriétés mais pas toutes les caractéristiques des Vertisols. Ces sols sont souvent associés aux Vertisols dans la nature (Spaargaren, 1994). L'association des conditions climatiques, la topographie et la roche mère détermine la relation avec les autres sols. Généralement, les Vertisols occupent la partie basse du paysage (Fig.2.4). Les sols comme les Calcisols vertiques, les Luvisols ou les Cambisols sont souvent plus élevés topographiquement (Deckers et al., 2001).

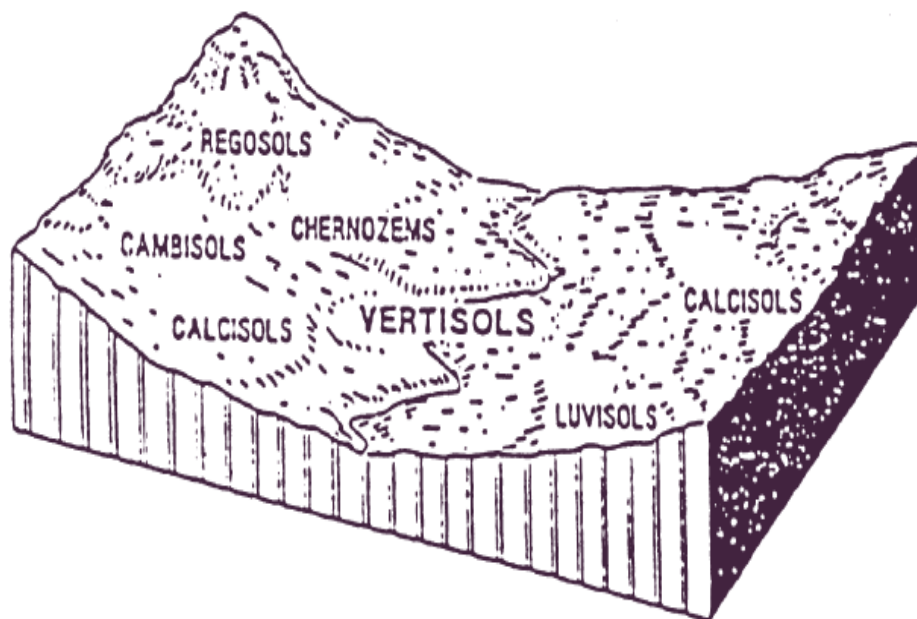


Fig.2.4. La relation spatiale du Vertisol avec les autres types des sols (Deckers et al., 2001)

2.6. Gestion des Tirs

Si les Tirs, comme la plupart des Vertisols, ont un haut potentiel de production agricole, ils sont par contre difficile à travailler (Wilbert, 1965; Dudal & Eswaran, 1988; Vandermerwe et al., 2001).

2.6.1. Contraintes des propriétés physiques

Les contraintes physiques sont le problème majeur des Vertisols et elles sont liées à leur régime hydrique (Coulombe et al., 1996). En effet, étant des sols riches en argiles gonflantes, ils retiennent beaucoup d'eau quand ils sont secs, demandant à la fois d'être drainés pour éliminer rapidement l'excès d'eau et d'être arrosés avant qu'il y a un déficit hydrique (Bryssine, 1971 ; Mrabet, 1989). Ceci est confirmé par les travaux de Dudal (1980) et De Pauw (1988). Ce dernier a montré que ces sols sont vulnérables à la variabilité climatique s'ils ne sont pas aménagés convenablement. En effet, à l'état humide, ces sols ayant un faible pouvoir infiltrant (jusqu'à 0,2 mm/h), demandent un drainage d'au moins superficiel sinon ils deviennent hydromorphes créant des difficultés importantes (asphyxie des plantes et non accessibilité pour les engins). A l'état sec, l'apparition des fentes de retraits pose un problème sérieux pour la production agricole dans ces sols (Deckers et al., 2001). L'aménagement de ces Vertisols dans les zones semi-arides du Maroc passe par l'identification d'un système capable de conserver l'eau dans les Tirs le plus longtemps possible en limitant la création de fentes de retraits et en réduisant leurs érodibilités (Bryssine, 1980 ; Mrabet, 1989).

2.6.2. Contraintes liées aux éléments nutritifs

Les Vertisols sont considérés relativement très riches en éléments fertilisants (Duchaufour, 1998). Certes, leur taux de potassium est souvent élevé alors que la teneur en phosphore est généralement faible. De même, la teneur en azote est souvent faible (Wilbert, 1965 ;

Nachtergaele, 1976; Deckers et al., 2001; Pal et al., 2011) mais l'apport de l'azote dans ces Vertisols doit être prudent afin d'éviter les pertes dues à la volatilisation et dénitrification (IBSRAM, 1987). Les mêmes observations ont été soulevées dans le cas des Tirs. En effet, Badraoui (1988) et Moujahid (2007) ont montré que la minéralogie de ces sols pose des problèmes de fertilité en phosphore et en azote pour les plantes. Le développement d'un système de culture, capable d'améliorer la teneur en matière organique de ces sols, est recommandé pour faire face à ces contraintes de fertilité en phosphore et en azote (Badraoui et al., 1995).

2.7. Conclusion

En guise de conclusion, on peut affirmer que les Tirs du Maroc ont beaucoup de similitude avec les Vertisols à climat Méditerranéen et ils occupent une grande superficie dans le pays (0,9 M ha). Cependant, ces sols sont souvent surexploités et dégradés. Ils nécessitent l'adoption des systèmes de cultures et d'aménagement capables d'améliorer leurs qualités physico-chimiques et les rendent productibles de manière durable. L'agriculture de conservation peut être une alternative prometteuse à la gestion durable des Tirs du Maroc mais l'adoption d'un tel système nécessite la réalisation des travaux de recherche sur le comportement de ces sols sous les techniques culturales de conservation (ex : semis direct) en tenant compte des conditions locales du milieu.

2.8. Références

- Ahmad, N., 1983. Vertisols, *In*. Wilding, L. P., Smeck, N. E. & Hall, G. F. (eds). Pedogenesis and Soil Taxonomy. The Soil Orders. Vol. II. Elsevier, Amsterdam. 91-123.
- Ahmad, N., 1996. Occurrence and distribution of Vertisols, *In*. Ahmad, N. & Mermut, A. (eds). Vertisols and Technologies for Their Management. Elsevier, Amsterdam. 1-41.
- Anderson, M.S & Byers, H.G., 1931. Technical bulletin No.228. US Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- Aubert, G., 1963. Classification pédologique utilisée par les pédologues français. Conférence donnée le 27 Avril 1963 à l'INRA de Rabat. Diffusion limitée. 18 p.
- Badraoui, M., 1988. Mineralogy and potassium availability in soils from the Chaouia and Gharb regions of North Western Morocco. PhD Dissertation, University of Minnesota, St.Paul, Minnesota, US. 199 p.
- Badraoui, M., 2006. Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc. In 50 ans de développement humains et perspectives 2025. 27p.
- Bardaoui, M. & Bloom, P. R., 1990. Iron-rich high-charge beidellite in Vertisols and Mollisols of the High Chaouia region of Morocco. Soil Science Society America Journal. 54, 267-274.
- Badraoui, M., Soudi, B., Moujahid, Y., Bennani, F., Bouhlassa, S. & Mikou, M., 1995. Mineralogical considerations in soil fertility management in Morocco. Proceedings of the Soil Fertility Workshop, Accomplishments and Future Challenges in Dry Land Soil Fertility Research in the Mediterranean Area, 19-23 November, Aleppo, Syria. 267-278.
- Biberson, P., 1971. Essai de redéfinition des cycles climatiques du Quaternaire continental du Maroc. Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire; V (1), 3-14.

- Booltink, H.W.G., Hatano, R. & Bouma, J., 1993. Measurement and simulation of bypass flow in a structured clay soil. A physico-morphological approach. *J. of Hydr.* 148, 149-168.
- Bouma, J., 1983. Use of soil survey data to select measurement techniques for hydraulic conductivity. *Agric. Water Managem.* 6 (2/3), 177-190.
- Bouma, J. & Loveday, J., 1988. Characterizing soil water regimes in swelling clay soils. *In* Wilding, L.P. and Puentes, R. (eds). *Vertisols. Their distribution, properties, classification and management.* p. 83-97. (eds), Texas A and M Univ; College Station, Texas, USA.
- Bryssine, G., 1969. Contribution à l'étude du calcaire dans les sols marocains. Recherche sur le calcaire grossier dans les sols du Saïs et du Tadla. *Al Awamia.* 33, 45-112.
- Bryssine, G., 1971. Les Tirs du Maroc, Les cahiers de la recherche agronomique, INRA Editions, p.87-112.
- Bryssine, G., 1980. Contribution à l'étude de la typologie des sols au Maroc. Attorba, *Bulltin AMSSOL.* 22p.
- Constanz, J., Herkelrath, W., & Murphy, F., 1988. Air encapsulation during infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 10-16.
- Coulombe, C. E., Wilding, L. P., Dixon, J. B., 1996. Overview of Vertisols. characteristics and impacts on society, in. Sparks, D.L. (eds). *Advances in Agronomy.* Academic Press, New York. 57, 289-375.
- CPCS, 1967. Classification des sols, commission de pédologie et de cartographie des sols, Publ. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Grignon, France. 87p.
- Deckers, J., Spaargaren, O. & Nachtergaele, F., 2001. Vertisols, genesis, properties, and soil scope management for sustainable development. *In*. Syers, J.K., Penning de Vries, F.W.T. &

Nyamudeza, P. (eds.). The Sustainable Management of Vertisols. IBSRAM Proceedings. N° 20. CABI.

Deflandre, A., 1972. L'influence de divers constituants du sol sur la capacité d'échange. Recherche sur les sols du Gharb. Communication présentée à la réunion de la section de pédologie. Al Awamia. 36, 91-125.

Del Villar, H., 1953. Méthode de classification et analyse des sols. Travaux scientifiques. Cahier de la recherche agronomique. N°2. 193p.

De Pauw, E., 1988. Assessing the agro-climatic potential of Vertisols. Management of Vertisols in Sub-Saharan Africa. In Jutzi, S., Haque, I., McIntire, J. & Stares, J. (Eds). Proceedings of Conference held at ILCA, Addis Ababa, Ethiopia, September 1987, 431p.

Duchaufour, Ph., 1998. Handbook of Pedology. Soils, Vegetation and Environment. (eds). Balkema. 264 p.

Dudal, R., 1965. Dark clay soils of tropical and subtropical regions. FAO Agric. Dev. Paper 83, FAO, Rome. 161p.

Dudal, R., 1980. Soil-related constraints to agricultural development in the tropics. In. Soil related constraints to food production in the tropics. International Rice Research Institute, Los Banos, The Philippines.

Dudal, R. & Eswaran H., 1988. Distribution, properties and classification of Vertisols. In. Wilding L.P. et Puentes R. (eds). Vertisols. Their Distribution, Properties, Classification and Management. SMSS. Technical monograph. N°18. Texas University, College station, Texas, USA, p. 1-22.

Eswaran, H. Kimble, J. & Cook, T., 1988. Properties, genesis and classification of Vertisols. In Hirekus, L.R., Seghal, J.L., Pal D.K. & Deshpande S.B. (eds). Classification, Management

and Use Potential of Swell-Shrink Soils. Trans. Int. Workshop Swell-Shrink soils (INWOSS), Nagpur, India. Oxford et IBH Pub. Co.Pvt. Ltd. New Delhi, p.1-24.

Faybihenko, B.A., 1995. Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air. Water Resour. Res. 31, 2421–2435.

Hess, C. & Shoen, U., 1964. Tirsification et classification des Vertisols Apport de l'analyse minéralogiques des argiles à la connaissance des Tirs. Al Awamia.13, 42-119.

IBSRAM (International Board for Soil Research and Management Inc.), 1987. Management of Vertisols under semi-arid conditions. *In*. Proceedings of the First Regional Seminar on Management of Vertisols under Semi-Arid Conditions, Held at Nairobi, Kenya. IBSRAM Proceedings N° 6. printed in Thailand.

Icole, M., 1964. Pédogenèse des Vertisols en Chaouia. Rapport technique. Al Awamia. 11, 71-87.

Leather, J. W., 1898. On the composition of Indian soils. Agricultural ledger. Agriculture series, 25, 5(2).

Mahler, P., 1959. Note sur les sols tirsifiés du Haouz. INRA Editions. Rabat. p.167-172.

Miège, E. & Bryssine, G. 1941. Recherches préliminaires sur quelques propriétés des Tirs noirs du Gharb. Ass. Maroc. Etude Sols. p. 4-17.

Miège, E., 1956. Le plâtrage des Tirs. Bull. Soc. Agri. Maroc. Rabat. 72, 13-17

Moujahid, Y., 2007. Physico-chimie, minéralogie et dynamique du phosphore et du potassium dans quelques sols marocains. Doctorat. Université Mohammed V, Rabat. 226 p.

Mrabet, R., 1989. Contribution à l'étude du processus d'infiltration d'eau dans deux Vertisols. Mémoire d'Ingénieur Agronome, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, 200 p.

Murthy, R. S., Bhattacharjee, J. C., Landey, R. J. & Pofali, R. M., 1982. Distribution, characteristics and classification of Vertisols, *In*. Vertisols and Rice Soils of the Tropics, Symposia paper II, 12th International Congress of Soil Science, New Delhi, Indian Society of Soil Science. p. 3-22.

Nachtergaele, F., 1976. Studies of some saline and sodic soils in Sudan. Soil Survey Administration, Tech. Bull. 24. FAO/UNDP Project, Wad Medani. 91 p.

Naman, F., Soudi, B. & Chiang, N.C., 2001. Impact de l'intensification agricole sur le statut de la matière organique des sols en zones irriguées semi-arides au Maroc. Etude et Gestion des Sols. 8, 269- 277.

Pal, D. K., Bhattacharyya, T. & Wani, S. P., 2011. Formation and management of cracking clay soils (Vertisols) to enhance crop productivity. Indian Experience. *In*. Lal, R. & Stewart, B.A. (eds.). World Soil Resources and Food Security, Francis and Taylor, *In Press*.

Radford, B. J., Bridge, B. J., Davis, R. J., McGarry, D., Pillai, U. P., Rickman, J. F., Walsh, P. A. & Yule, D. F., 2000. Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. Soil and Tillage Research. 54, 155-170.

Shoen, U., 1965. Contribution à la connaissance des minéraux argileux dans les sols marocains. Thèse de Doctorat. Université de Göttingen. INRA. Rabat. Cahier de la Recherche Agronomique. 26.179 p.

Soil Survey Staff, 1975. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Agriculture Handbook, Vol. 436. Soil Conservation Service. US Dept. of Agriculture. Washington, DC.

Soil Survey Staff, 2010. Keys to Soil Taxonomy. SMSS Technical Monograph , Eleventh edition. International Soils, Agronomy Department, Cornell University, Ithaca, NY.

Spaargaren, O., 1994. World Reference Base for soil resources. (eds), ISSS, ISRIC, FAO, Wageningen/Rome.

USDA-SCS, 1994. State Soil Geographic Data Base (STATSGO). Data User Guide. United States Department of Agriculture Soil Conservation Service. National Soil Survey Center. Lincoln, Nebraska.

Vandermerwe, A.J., De Villiers, M.C., Buhmann, C., Beukes, D. & Walters, M.C., 2001. Vertisols management in South Africa. *In*. Syers J.K., Penning de Vries, F.W.T. & Nyamudeza, P. (eds). The sustainable Management of Vertisols, CABI Editions, p. 85-100.

Watteau, R., 1967. Carte de reconnaissance des sols de Zaer au 1/200 000. Inédit. Légende et tableau descriptif. Dir. Rech. Agron. Rabat.

Wilbert, J., 1965. Localisation géographique de la tirsification au Maroc. Les cahiers de la recherche agronomique, INRA Editions, p.1-22.

Wilding, L. P. & Coulombe, C. E., 1996. Expansive soils. distribution, morphology and genesis. *In*. Baveye, P. & McBride, M. B. (eds.). Proceedings NATO-ARW. Clay swelling and expansive soils, Kluwer Academic, Dordrecht, Neatherland.

Chapitre 3. Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen

Ce chapitre est adapté à partir d'un article publié suivant:

Moussadek, R., Mrabet, R., Zante, P., Lamachère, J-M., Pepin, Y., Le Bissonnais, Y., Ye, L., Verdoodt, A. & Van Ranst, E. 2011. **Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen**. Canadian Journal of Soil Science. 91(4). 627-635.

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

Résumé

Les études d'érosion sur les Vertisols Méditerranéens sous semis direct sont rares. Cette étude traite de l'effet du travail du sol sur le ruissellement (LR) et les pertes en terre (Ero) en relation avec les propriétés du sol. Trois techniques culturales ont été étudiées sous simulation de pluie: semis avec travail conventionnel (SC), semis direct sans résidus de culture (SD0) et avec 50% des résidus retournés aux parcelles et laissés en surface (SD50). Les résultats ont montré que la présence du mulch avait réduit le ruissellement et les pertes en sol de plus de 50% sous SD50 par rapport à SD0 et SC. Les sols sous SD50 et SD0 présentaient un diamètre moyen pondéral (DMP) plus stable, plus de matière organique (MO) et une densité apparente (Da) plus élevée que sous SC. Une régression multiple a montré que lorsque le sol était sec, la Da expliquait respectivement 84% et 96% de la variation du ruissellement (LR) et des pertes de terre par érosion (Ero). Par contre, lorsque le sol était humide c'est le DMP qui expliquait respectivement 47% et 69 % de la variation de LR et Ero. En conclusion, certes sept années en SD ont amélioré la qualité du sol (DMP, MO), par rapport au SC, mais le retour à la surface du sol d'environ 50% des résidus de récolte s'est avéré nécessaire sous SD pour réduire significativement l'érosion hydrique.

Mots clés. Semis direct, Mulch, érosion, simulation de pluie, Vertisol.

3.1. Introduction

Au Maghreb et dans les régions méditerranéennes, l'érosion hydrique est un problème majeur en raison d'un couvert végétal réduit, de l'agressivité des pluies et de la fragilité des sols, ainsi ces facteurs contribuent largement à la dégradation des terres (Roose, 1994; Lal et al., 1999).

Cette dégradation dépend de la vulnérabilité du sol aux paramètres de l'érosion hydrique, notamment le ruissellement qui provoque le détachement du sol en particules solides transportées par l'écoulement superficiel (Roose, 1994). Ce sont les sols labourés qui sont les plus exposés à l'érosion hydrique du fait de leur faible teneur en matière organique qui augmente la sensibilité des agrégats vis à vis de l'action des agents érosifs (Masciandaro et al., 1998; Gómez et al., 1999).

Dans le même sens, Lahlou et al. (2005) ont constaté que l'agriculture conventionnelle basée sur le labour intensif dégrade les propriétés physiques du sol et le rend plus sensible au processus de ruissellement. Devant cette situation alarmante, plusieurs chercheurs encouragent le remplacement du labour conventionnel par des pratiques agricoles de conservation tel que le semis direct (Alvaro-Fuentes et al., 2008). En effet, les avantages du semis direct sur l'amélioration du taux de la matière organique du sol ont été relevés dans plusieurs travaux de recherche (Lal, 1989; Mrabet et al., 2011). De plus, le semis direct contribue à l'amélioration de la stabilité structurale du sol (Duiker & Lal, 1999; Saroa & Lal, 2003), améliore sa porosité (Mulumba & Lal, 2008) et augmente sa rétention en eau (Havlin et al., 1990; Duiker & Lal, 1999). Quant à l'écoulement hydrique, Celiki (1987) et Mrabet (2002) ont observé que des sols méditerranéens labourés pouvaient présenter une infiltration inférieure à celle des sols sans labour. Le maintien des résidus à la surface du sol sous semis direct assure une protection contre l'impact des gouttes de pluie et réduit ainsi l'érosion du sol (Rees et al., 2002; Findeling et al., 2003; Roose et al., 2008).

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

Au Maroc, les recherches sur le semis direct ont commencé en 1983 dans les régions semi-arides (Bouzza, 1990) et plusieurs études sur les effets de ce système de culture sur les rendements et sur la qualité du sol ont été réalisées. Cependant, aucune étude n'a eu lieu pour quantifier l'effet du semis direct (avec ou sans résidus) sur les propriétés du sol (densité apparente, matière organique, stabilité structurale) et son impact sur le ruissellement et les pertes en terres (Mrabet, 2008).

Pour pallier en partie à cette lacune sur les Vertisols du Plateau Central Marocain, les objectifs de ce travail sont :

- [1] d'étudier les effets de pluie simulée sur les paramètres de ruissellement et d'érosion d'une parcelle sous travail conventionnel, sous semis direct sans résidus de récolte ou avec 50% des résidus de récolte retournés à la surface de la parcelle;
- [2] d'analyser les effets du semis direct et des résidus de récolte sur les propriétés du sol ;
- [3] d'identifier la relation entre les paramètres de l'érosion hydrique et les propriétés du sol.

3.2. Matériels et méthodes

3.2.1. Description du site

L'expérimentation est localisée dans la station expérimentale de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Merchouch (60 km au sud de Rabat; 33°37' N; 6°43' O). Les moyennes annuelles des précipitations et des températures sont de l'ordre de 400 mm pour les précipitations et de 23°C pour les températures. Les moyennes mensuelles interannuelles des précipitations et des températures sur une période de 40 ans (1969-2009) sont présentées dans la figure 3.1.

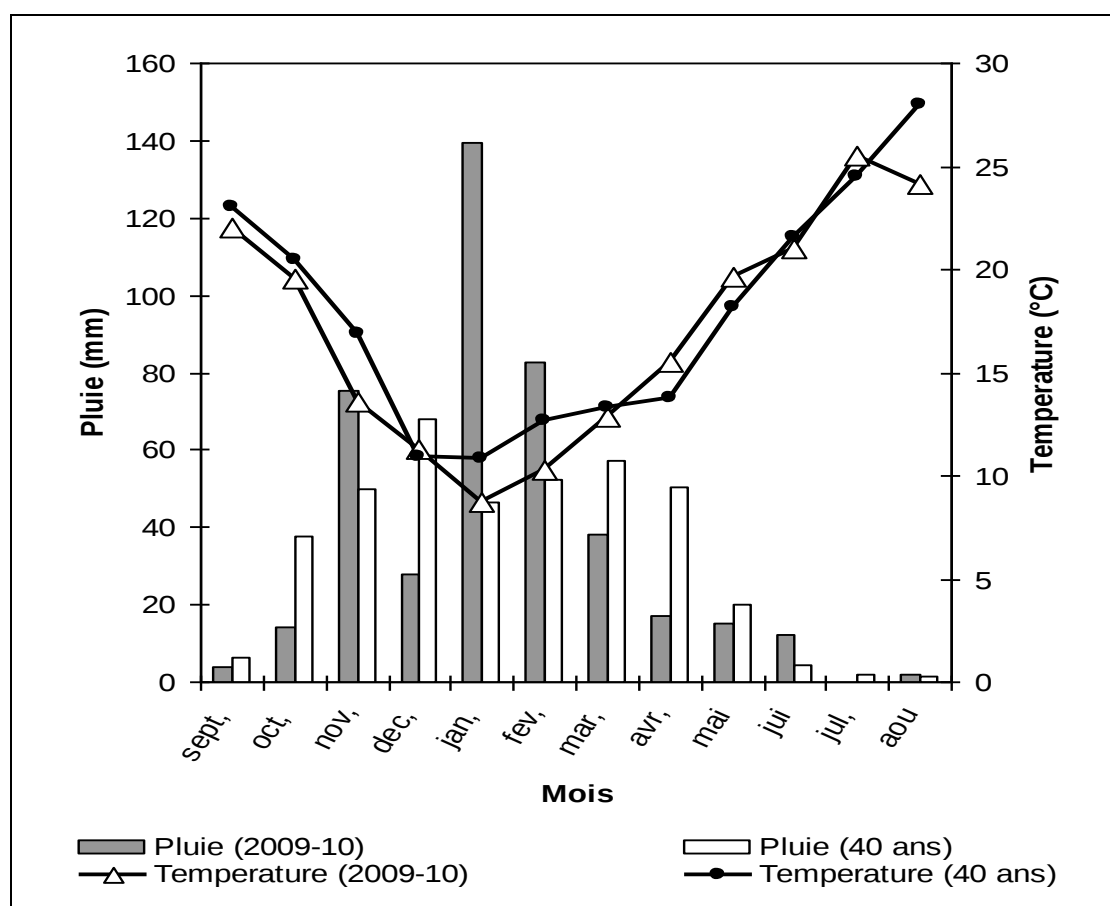


Fig.3.1. Moyennes mensuelles interannuelles des précipitations et des températures à la station de Merchouch comparées aux valeurs mensuelles de l'année 2009-2010.

Cette expérimentation a été installée depuis 2004 dans le but d'observer l'effet à long terme du semis direct sur la qualité du sol et la production agricole. Elle a été réalisée sur une parcelle de 4 ha de pente faible (<5%). Le sol est un Vertisol (Chromic Calcixerert selon la classification américaine), riche en argile (>50% d'argile), avec un pH basique et un drainage externe faible (Tableau 3.1).

Tab.3.1. Caractéristiques du sol à l'installation de l'expérimentation en 2004

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	pH (1.1 H ₂ O)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ₂ O (mg/kg)	Carbone organique (g/kg)	Azote totale (g/kg)
0-20	50,0	37,3	12,7	7,83	19,61	323	12,2	1,18
20-40	51,3	38,2	10,5	8,26	4,24	184	11,4	1,07
40-90	52,5	35,1	12,4	8,60	0,53	145	9,7	0,89

L'essai est constitué de deux systèmes de travail du sol: un semis direct (SD) et un semis avec travail conventionnel (SC), pratiqués de 2004 à 2010 sur deux parcelles adjacentes de 200 m de longueur et de 100 m de largeur chacune. Le système conventionnel adopté est celui pratiqué par les agriculteurs de la région et qui consiste au retournement profond (30 cm) du sol durant l'été avec un « stubble plow », suivi par un passage au chisel (15 cm) et de deux passages par une herse à disques (5 cm) pour préparer le lit de semence. Sous semis direct, il n'y a aucune opération de travail ou de préparation du sol. En effet, le semoir utilisé place les semences et les fertilisants sans aucun retournement du sol. Par souci d'homogénéisation, les deux parcelles ont été laissées en jachère les deux ans précédant la mise en place de l'essai. Depuis septembre 2004, les parcelles reçoivent le même itinéraire technique (rotation, variété, dose de semis, dose et type engrais). En effet, la rotation adoptée est le blé tendre-lentille. Pour la culture du blé (d'hiver), les parcelles reçoivent la même dose de semis (0,14 t ha⁻¹), la

même dose d'engrais ($0,15 \text{ t ha}^{-1}$) de type complexe (14-28-14 c.à.d. 14% d'azote, 28% de phosphore et 14% de potassium). Quant à la lentille, la dose de semis est de $0,04 \text{ t ha}^{-1}$ et la dose d'engrais est de $0,10 \text{ t ha}^{-1}$ de type complexe (14-28-14).

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

3.2.2. Les mesures de sol effectuées

3.2.2.1. Mesures de la stabilité structurale

Avant le démarrage de la simulation de pluie, trois échantillons de sol ont été prélevés à la surface (0-5 cm) dans les trois traitements (SC, SD0 et SD50) afin d'étudier la stabilité des agrégats selon la procédure proposée par Le Bissonnais (1996). Les échantillons ont été tamisés à sec pour obtenir des agrégats de 2 à 5 mm qui ont été ensuite séchés à l'étuve à 40°C pendant 48 heures. Ces agrégats ont subi trois tests de stabilité. (i) un traitement d'humectation rapide par immersion simulant la désagrégation du sol sous pluie intense après une période sèche; environ 5 g d'agrégats ont été mis dans un bécher et immergés dans l'eau distillée pendant 10 minutes; (ii) un traitement d'humectation lente par capillarité imitant le comportement du sol sous pluie modérée en période humide; environ 5 g d'agrégats ont été

humectés par capillarité (à l'aide d'un papier filtre) avec de l'eau distillée pendant 60 minutes;

(iii) un traitement de désagrégation mécanique par agitation après ré-humectation permettant de tester la cohésion du sol à l'état humide indépendamment de l'éclatement ; environ 5 g d'agrégats ont été immergés dans l'éthanol pendant 30 minutes, puis transférés dans un flacon d'eau distillée; l'ensemble a été soumis à 20 retournements sur un agitateur rotatif et laissé à décanter pendant 10 minutes.

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

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

Ce qui devient, pour les tamis utilisés:

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

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

3.2.2.2. Densité apparente

La mesure de la densité apparente (D_a) a été réalisée selon la procédure décrite par Grossman et Reinsch (2002). Juste avant le démarrage des tests de simulation de pluie, on a prélevé dans chacun des trois traitements (SC, SD0 et SD50) des cylindres non remaniés de 1600 cm³ à deux profondeurs (0-15 et 15-30 cm) et avec trois répétitions. Ces cylindres ont été pesés et laissés à l'étuve (105 °C) pendant 24 h et repesés pour obtenir le pourcentage du poids de l'eau par rapport au poids du sol sec. Ce dernier est ramené au volume du cylindre pour avoir la densité apparente de l'échantillon.

3.2.2.3. Matière organique

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

3.2.2.4. Simulation de pluie

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

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

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

- les lames ruisselées (en mm) durant la 1^{ère} et la 2^{ème} pluie (LR1 et LR2),
- les lames infiltrées (en mm) à la fin de la 1^{ère} et de la 2^{ème} pluie (Linf1 et Linf2) calculées comme suit: ($Linf_i = Pluie_i - LR_i$; pour la pluie i),
- les coefficients d'écoulement (en %) durant la 1^{ère} et la 2^{ème} pluie (Ke1 et Ke2) avec

$$(Ke_i = (LR_i / pluie_i) \times 100 \text{ ; pour la pluie } i) ;$$
- les concentrations en sédiments de l'eau de ruissellement (en g L⁻¹) durant la 1^{ère} et la 2^{ème} pluie (Conc1 et Conc2) ;
- les taux de perte en sol (en g m⁻²) durant la 1^{ère} et la 2^{ème} pluie (Ero1 et Ero2) avec

$$(Ero_i = Conc_i \times LR_i \text{ ; pour la pluie } i).$$

3.2.3. Analyse statistique des données

L'effet des 3 traitements (SC, SD0 et SD50) sur les propriétés du sol a été testé par l'utilisation de la méthode statistique de la variance (ANOVA) avec le test du Tukey pour la comparaison des moyennes. La régression multiple (type stepwise) a été utilisée pour mettre en avant l'existence des relations entre les différents paramètres du sol et les coefficients de l'érosion hydrique. Le logiciel utilisé pour les traitements statistiques est SPSS version 17.

3.3. Résultats et discussions

3.3.1. Ruissellement et pertes en terre

La figure 3.2 montre que durant la première pluie (36 mm h^{-1} pendant 1 heure), sur un sol de faible humidité pondérale en surface ($<10 \%$), la lame écoulée reste faible pour l'ensemble des traitements (inférieure à 5 mm).

Par contre le coefficient d'écoulement (Ke_1) est devenu plus important sur les micro-parcelles sous SD0 (par rapport au SD50 et SC) et a atteint, après 60 minutes de pluie de 36 mm h^{-1} , une valeur 11% . Au cours de la seconde pluie (60 mm h^{-1} pendant 30 minutes), le coefficient d'écoulement Ke_2 a atteint 68% pour SD0, 56% pour SC contre seulement 21% pour SD50 (Tableau 3.2). Si on compare les débits ruisselés à l'intensité de la pluie, le rapport est presque identique ($0,88$) pour SC et SD0 mais il reste nettement plus faible ($0,70$) pour SD50. Quant aux vitesses d'infiltration qui correspondent à ces débits ruisselés stabilisés, elles sont égales à $6,8 \text{ mm h}^{-1}$ pour SD0, $7,0 \text{ mm h}^{-1}$ pour SC et $18,0 \text{ mm h}^{-1}$ pour SD50.

Le Tableau 3.2 montre que le semis direct avec résidus se distingue nettement des autres traitements avec une lame infiltrée significativement plus élevée ($Lin_2 = 23,7 \text{ mm}$, contre $13,2 \text{ mm}$ et $9,7 \text{ mm}$ pour respectivement SC et SD0). Plusieurs auteurs ont obtenu des résultats similaires. En effet, Lang et Mallet (1984) ont trouvé que l'infiltration augmentait de 54% lorsque 45% des résidus étaient laissés au sol. Ruan et al. (2001) ont montré que l'infiltration augmentait de manière curvilinéaire avec la quantité de résidus laissés au sol.

Par ailleurs, la concentration des sédiments durant la seconde pluie s'est avérée aussi significativement plus élevée sous SC et SD0 ($2,8 \text{ g L}^{-1}$ et $2,4 \text{ g L}^{-1}$, respectivement) par rapport au SD50 ($1,4 \text{ g L}^{-1}$). Les taux d'érosion mesurés ont été faibles sous SD50 ($E_{ro2} = 8,8 \text{ g m}^{-2}$) et nettement élevés sous SD et SC ($E_{ro2} = 49,9 \text{ g m}^{-2}$ et $47,9 \text{ g m}^{-2}$ respectivement).

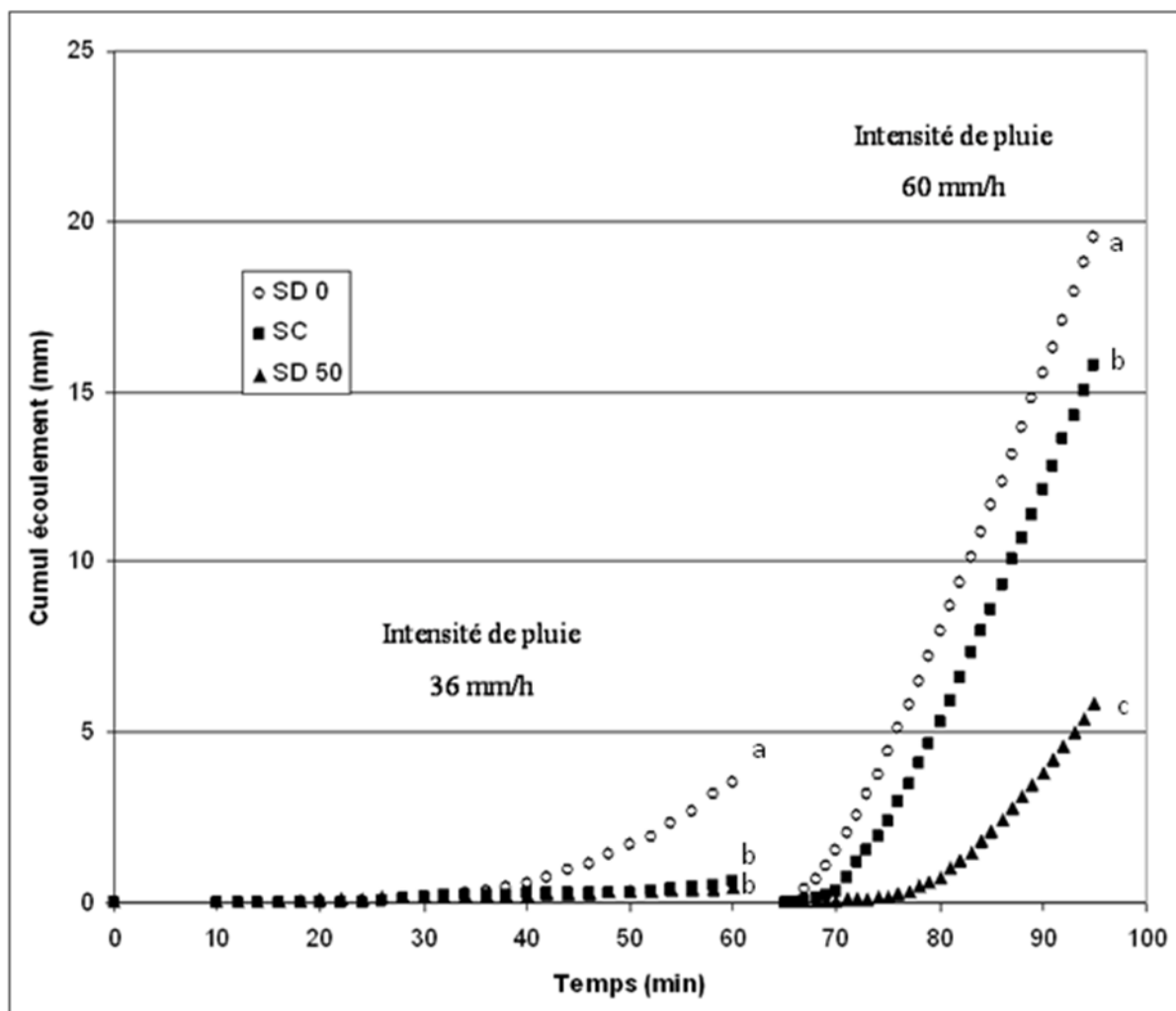


Fig.3.2. Effet de deux intensités de pluie sur le ruissellement cumulé sous semis avec travail conventionnel (SC), semis direct sans résidus de culture (SD0) et sous semis direct avec 50% des résidus retournés à la surface du sol (SD50).

Pour chaque intensité de pluie, les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents, (Tukey ($P < 0,05$)).

Ceci indique que la présence des résidus en surface du sol est indispensable pour réduire les pertes en terres sur les Vertisols en SD. Ceci concorde avec les travaux de Bradford et Huang (1994) qui ont rapporté que le mode de travail du sol (SD ou SC) intervient peu dans le contrôle des pertes en terres et que le mulch laissé à la surface du sol réduit l'impact mécanique des gouttes de pluie ce qui diminue les pertes en terres. Cependant, Doran (1980) a montré que le semis direct comme mode de travail du sol est indispensable pour réduire l'érosion du sol et que l'activité biologique augmente en présence de mulch dans les sols non

labourés ce qui améliore leurs propriétés physiques et les rendent plus résistants aux agents de l'érosion hydrique.

Tab.3.2. Paramètres de ruissellement et d'érosion mesurés lors de la simulation de pluie selon le mode du travail du sol

Coefficients ^Y	Traitements ^Z		
	SC	SD0	SD50
LR1 (mm)	0,77 (0,61) a ^X	3,92 (1,17) b	0,43 (0,11) a
LR2 (mm)	16,82(2,90) b	20,37 (1,34) c	6,29(2,81) a
Ke 1 (%)	2,12 (0,11) a	11,14(0,32) b	1,23 (0,19) a
Ke2 (%)	56,00 (10,00) b	68,00 (4,05) c	20,90 (9,38) a
Linf1(mm)	35,23(0,61) b	32,08(1,17) a	35,57 (0,11) b
Linf2 (mm)	13,19(2,90) b	9,63(1,34) a	23,71 (2,81) c
Conc1 (g L ⁻¹)	1,56(1,56) b	1,56 (1,58) b	0,63 (0,94) a
Conc2 (g L ⁻¹)	2,85(2,42) b	2,45(1,85) b	1,41(0,96) a
Ero1 (g m ⁻²)	1,20(0,96) b	6,12 (1,85) c	0,27 (0,47) a
Ero2 (g m ⁻²)	47,95(7,01) b	49,98 (10,93) b	8,84 (4,09) a

^Z **SC**, semis avec travail conventionnel; **SD0**, semis direct sans résidus de culture; **SD50**, semis direct avec 50% des résidus retournés à la surface de la parcelle.

^Y **LR1**, lame ruisselée durant 1^{ère} pluie; **LR2**, lame ruisselée durant 2^{ème} pluie; **Ke1**, coefficient d'écoulement durant 1^{ère} pluie; **Ke2**, coefficient d'écoulement durant 2^{ème} pluie; **Linf1**, lame infiltrée durant 1^{ère} pluie; **Linf2**, lame infiltrée durant 2^{ème} pluie; **Conc1**, concentrations en sédiment en eau ruisselé durant 1^{ère} pluie; **Conc2**, concentrations en sédiment en eau ruisselé durant 2^{ème} pluie; **Ero1**, perte en sol durant 1^{ère} pluie ; **Ero2**, perte en sol durant 2^{ème} pluie.

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

3.3.2. Stabilité des agrégats, matière organique et densité apparente

3.3.2.1. Stabilité des agrégats

Les résultats des tests de la stabilité structurale (Figure 3.3) montrent qu'il n'y a pas eu de différence significative entre les trois pratiques culturales pour le test d'humectation rapide avec des valeurs de DMP faibles pour les trois traitements (<0,8 mm).

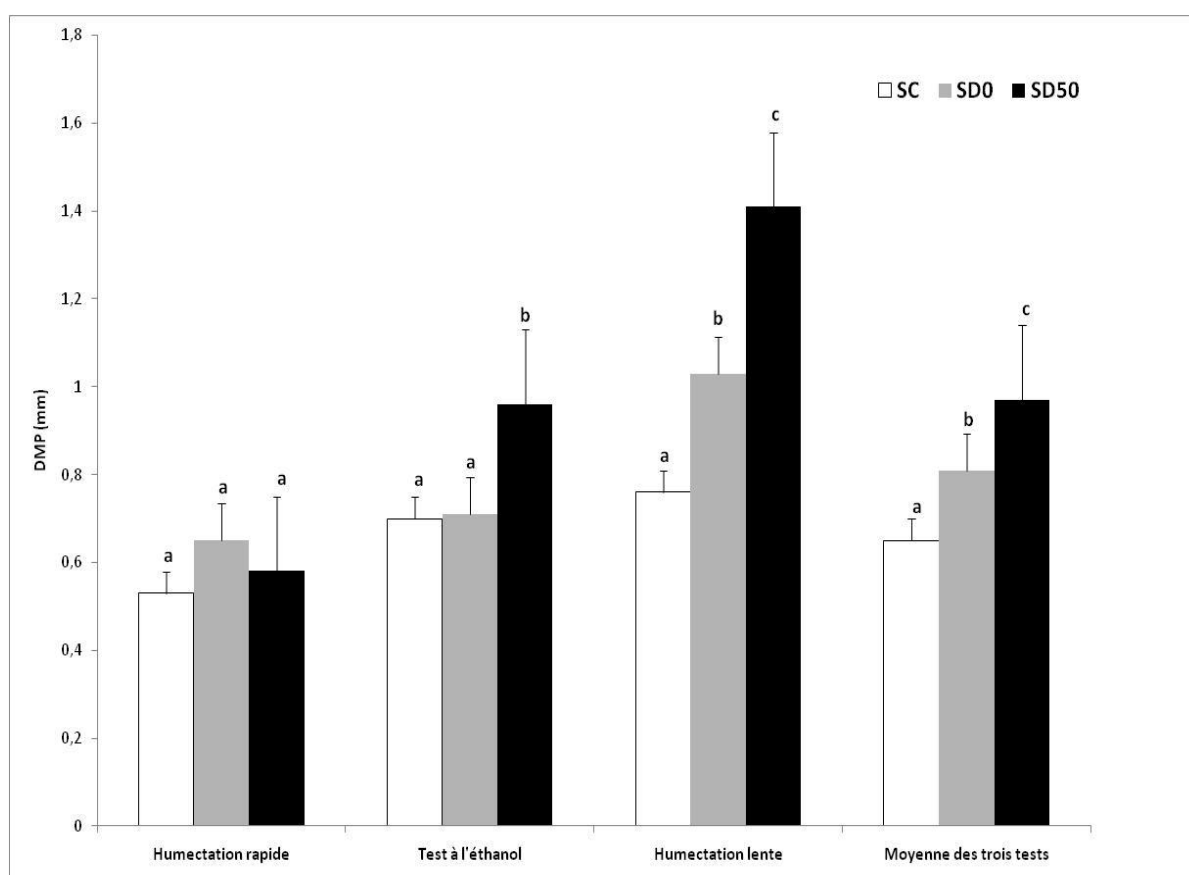


Fig.3.3. Effet des modes du travail du sol (semis avec travail conventionnel (SC), semis direct sans résidus de culture (SD0) et sous semis direct avec 50% des résidus retournés à la surface du sol (SD50)) sur le diamètre moyen pondéral (DMP).

Pour chaque type de mesure du DMP (humectation rapide, éthanol, ré-humectation et DMP moyen), les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents selon le test de Tukey ($P < 0,05$).

Ce Résultat démontre qu'après 7 années sous SD (avec ou sans résidus), le sol ne peut toujours pas résister mieux à l'éclatement suite à une réhumectation rapide. Il semble qu'il faut plus de temps dans les conditions semi-aride du Maroc pour que le Vertisol sous SD accumule suffisamment de MO afin qu'il puisse résister à l'éclatement des agrégats sous ce test d'humectation rapide.

Pour le test de ré-humectation lente, le sol sous semis direct avec paillage (SD50) présente une valeur de DMP égale à 1,41 mm, significativement plus élevée que pour les sols sous les autres pratiques (1,01 mm pour SD0 et 0,75 mm pour SC). Ceci montre que, sous semis direct, la présence des résidus améliore la résistance du sol lors d'une humectation lente qui simule l'effet des pluies modérées. De même, pour le test avec l'éthanol, la stabilité des agrégats était supérieure sous SD50 que sous SD0 et SC. Le DMP moyen obtenu pour les trois tests de stabilité a été significativement plus élevé sous SD (avec ou sans résidus) que sous SC. Ainsi on peut conclure que les parcelles sous SC ont une stabilité structurale faible (DMP <0,8 mm) alors que les parcelles sous SD (avec ou sans résidus) ont une structure plus stable selon les normes élaborées par Le Bissonnais (1996). Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Mrabet et al. (2001) qui ont rapporté que le semis direct améliore la stabilité structurale du sol.

3.3.2.2. La matière organique

Les résultats du Tableau 3.3 montrent que les parcelles sous semis direct avec résidus (SD50) ont une teneur plus élevée en matière organique (MO) que les autres pratiques culturales.

Ces résultats rejoignent ceux de Mrabet et al. (2001) qui ont trouvé que la teneur en matière organique a augmenté de 13% dans une profondeur du sol inférieure à 7 cm sous SD avec du mulch par rapport au SC dans un climat semi-aride similaire à celui de la région d'étude. Ce résultat est surprenant vu le temps relativement court de l'expérimentation mais certains auteurs expliquent ces résultats par les conditions climatiques semi aride du milieu qui

accélèrent la décomposition des résidus et favorisent l'accumulation de la matière organique en surface du sol sous SD (Paustian et al., 2000).

Tab.3.3. Effet des trois pratiques culturales sur les propriétés du sol

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

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

^y **MO**, taux de la matière organique ; **Da**, densité apparente du sol.

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

3.3.2.3. La densité apparente

Selon le Tableau 3.3, la Da était mesurée avant la première pluie (sol sec) et était élevée sous les trois traitements ($>1,4 \text{ g cm}^{-3}$) et elle a atteint la valeur de $1,69 \text{ g cm}^{-3}$ sous SD0 en 15-30 cm. Sachant que pour les Vertisols utilisées en agriculture, la Da peut atteindre 2 g cm^{-3} vu leurs teneurs en argiles gonflants (Murthy et al., 1982). En effet, la Da de la surface du sol (0-15 cm), était plus élevée en semis direct sans résidus ($1,67 \text{ g cm}^{-3}$) que celle obtenue en semis direct paillé ($1,51 \text{ g cm}^{-3}$) et en semis avec travail conventionnel ($1,45 \text{ g cm}^{-3}$). Ceci concorde avec les travaux de plusieurs auteurs (Bruce et al., 1990; Cassel et al., 1995) qui ont montré que sous SD, la densité apparente est plus élevée sur 75 cm du profil du sol par rapport au SC. Ceci amène à conclure que le semis direct augmente la compaction des sols argileux mais plusieurs auteurs estiment que cette compaction sous SD diminue avec le temps suite à l'intensification de l'activité biologique sous SD (Dress et al., 1994; Jordan et al., 2010). Il est à noter que malgré sa densité apparente élevée, le sol sous SD50 a présenté un taux

d'infiltration plus important que sous SC et SD0 (voir tableau 3.2). Ceci peut être expliqué, selon la figure 3.3, par la présence d'une structure stable sous SD50 par rapport aux autres traitements (SD0 et SC). Il est aussi probable que la présence des résidus sous SD50 a favorisé l'infiltration en freinant le déplacement de l'eau à la surface du sol et réduisant ainsi le ruissellement.

3.3.3. Relation entre les propriétés physiques et les coefficients de ruissellement

Pour expliquer les différences de ruissellement et de pertes en terre observées entre les trois pratiques culturales testées dans nos expériences, nous avons recherché l'existence éventuelle de relations entre les variables du ruissellement et de pertes en terre et les variables pédologiques qui pourraient a priori les influencer: DMP, Da et MO (Roose, 1994).

Le Tableau 3.4 montre les résultats de régressions multiples entre le ruissellement (LR) et pertes en terres (Ero) comme paramètres dépendants des trois propriétés mesurées du sol (DMP, Da et MO). Les résultats suggèrent que les propriétés du sol qui interviennent dans le déclenchement du ruissellement sont différentes selon l'état hydrique du sol. En effet, quand le sol était sec (avant la première pluie de simulation) et selon les équations de régression rapportées dans le Tableau 3.4 (Eq.2 et Eq.7), la Da a pu à elle seule expliquer 84 % de la variation de la lame ruisselée (LR1) et 96% de la variation des sédiments détachés du sol (Ero1). Cependant, quand le sol était humide (après une pluie de 36 mm h⁻¹ pendant 60 min) et selon les équations 5 et 10, c'est la stabilité structurale (DMP) qui est intervenu pour 47 % de la variation de la lame ruisselée (LR2) et pour 69 % de celle de l'érosion (Ero2).

Ces résultats sont en concordance avec les travaux de Le Bissonnais et al. (2007) qui ont trouvé des relations significatives entre l'érosion et la stabilité structurale. Par ailleurs, les équations 4 et 9, montrent que les régressions intégrant les deux propriétés physiques (Da et DMP) sont capables de mieux prédire le ruissellement et les pertes en sédiment quand l'humidité antécédente est élevée.

Tab.3.4. Relation entre les propriétés physiques du sol et le ruissellement

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

^z **LR1**, lame ruisselée durant 1^{ère} pluie; **LR2**, lame ruisselée durant 2^{ème} pluie ; **Ero1**, perte en sol durant 1^{ère} pluie ; **Ero2**, perte en sol durant 2^{ème} pluie.

^y **MO**, taux de matière organique (en %); **Da**, densité apparente du sol (en g cm⁻³) ; **DMP**, diamètre moyen pondéral (en mm).

^x **R²**, coefficient de détermination; **R² adj.**, coefficient de détermination ajusté; **Err. St.Est.**, erreur standard d'estimation.

Quant à la MO, elle intervient dans l'amélioration de la qualité de la régression pour le ruissellement quand le sol est sec (Eq.1) mais elle a un moindre effet quand le sol est humide (Eq.3 et Eq.8). Il est possible que l'effet de la MO soit masqué par les autres propriétés du sol (DMP, Da). En effet, une analyse de la corrélation entre ces trois paramètres a montré que la MO était corrélée significativement ($p < 0,05$) avec DMP ($r^2=0,71$) mais non corrélée avec Da ($r^2= 0,32$). Ceci rejoint les travaux de Blanco-Canqui & Lal (2007) qui ont observé de forte corrélation entre MO et DMP. En effet, l'accumulation de la MO sous SD s'est traduite par l'augmentation du DMP et l'amélioration de la résistance des agrégats à une réhumectation lente (Figure 3.3) et une meilleure infiltration de l'eau. Ces avantages sont plus évidents sous

SD50. En effet, l'apport de résidus de culture sous SD a amplifié l'augmentation de MO par rapport à SD0 (Tableau 3.3) ce qui a amplifié d'autant le DMP et la stabilité des agrégats à un point tel que les résultats dans le tableau 3.2 indiquent une diminution significative du ruissellement et une amélioration significative ($p < 0,05$) des conditions d'infiltration. Ceci semble être dû à un effet combiné d'un freinage de l'écoulement de l'eau en surface par les résidus et d'un meilleur développement d'une porosité inter-agrégats favorisant l'entrée de l'eau dans le sol.

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

3.4. Conclusions

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

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

3.5. Références

- Acosta, M. V., Reicher, Z., Bischoff, M. & Turco, R.F., 1999. The role of tree leaf mulch and nitrogen fertilizer on turfgrass soil quality. *Biol. Fertil. Soils* 29. 55-61.
- Alvaro-Fuentes, J., Arrúe, J. L., Cantero-Martínez, C. & López, M. V., 2008. Aggregate breakdown during tillage in a Mediterranean loamy soil. *Soil Till. Res.* 101. 62–68.
- Asseline, J. & Valentin, C., 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cahiers ORSTOM série hydrologie*. 15. 321-349.
- Blanco-Canqui, H. et Lal, R., 2007. Regional assessment of soil compaction and structural properties under no-tillage farming. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71.1770-1778.
- Bottenberg, H., Masiunas, J. & Eastman, C., 1999. Strip tillage reduces yield loss of snapbean planted in rye mulch. *Hort. Technol.* 9. 235–240.
- Bouzza, A., 1990. Water conservation in wheat rotations under several management and tillage systems in semiarid areas. PhD Thesis, University Nebraska, USA. 200p.
- Bradford, J. M. & Huang, C., 1994. Interill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil Till. Res.* 31. 353-361.
- Bruce, R. R., Langdale, G. W. & Dillard, A. L., 1990. Tillage and crop rotation effect on characteristics of a sandy surface soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54.1744-1747.
- Cassel, D. K., Raczkowaki, C. W. & Denton, H. P., 1995. Tillage effect on corn production and soil physical conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59.1436-1443.
- Celiki, I., 1987. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil Till. Res.* 83. 270–277.
- Doran, J. W., 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44.765-771.
- Dress, L. R., Karathansis, A. D., Wilding, L. P. & Belvins, R. L., 1994. Micromorphological characteristics of long term no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58.508–517.

- Duiker, S. W. & Lal, R., 1999. Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in Central Ohio. *Soil Till. Res.* 52. 73–81.
- Findeling, A. Ruy, S. & Scopel, E., 2003. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *J. Hydrol.* 275. 49–66.
- Gómez, J. A., Giráldez, J. V., Pastor, M. & Fereres, E., 1999. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil Tillage Res.* 52.167–175.
- Grossman, R. B. & Reinsch. T. G., 2002. Bulk density and linear extensibility. p. 201–228. *In* Dane, J.H. et Top, G.C. (eds). *Methods of soil analysis, Part 4, Physical methods*. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Havlin, J. L., Kissel, D. E., Maddus, L. D., Claassen, M. M. & Long, J. H., 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54. 448–452.
- Jones, O. R., Hauser, V. L. & Popham, T. W., 1994. No-tillage effects on infiltration, runoff and water conservation on dry land. *Trans. ASAE.* 37. 473–479.
- Jordan, A., Zavala, L. M. & Gil, J., 2010. Effect of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena.* 81. 77-65.
- Lahlou, S., Ouadia, M., Malam Issa, O., Le Bissonnais, Y. & Mrabet, R., 2005. Modification de la porosité du sol sous les techniques culturales de conservation en zone semi-aride Marocaine. *Etude et Gestion des Sols.* 12.69-76.
- Lal, R., Mokma, D. & Lowery, B., 1999. Relation between soil quality and erosion. p. 237–258. *In* All, R. (ends). *Soil Quality and Soil Erosion*, CRC Press, New York.
- Lal, R., 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture, tropics versus temperate environments. *Adv. Agron.* 42. 85–197.
- Lang, P. M. & Mallet, J. B., 1984. Effect of the amount of surface maize residue on infiltration and soil losses from a clay loam soil. *S. Afr. J. Plant Soil* 1.97-98.

- Le Bissonnais, Y., Blavet, D., De Noni, G., Laurent, J. Y., Asseline, J. & Chenu C., 2007. Erodibility of Mediterranean vineyard soils. Relevant aggregate stability methods and significant soil variables. *Eur. J. Soil Sci.* 58. 188-195.
- Le Bissonnais Y., 1996. Aggregate stability and assessment of crustability and erodibility. 1. theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47, 425-437.
- Masciandaro, G., Ceccantini, B. & Gallardo-Lancho, J. F., 1998. Organic matter properties in cultivated versus set-aside arable soils. *Agri. Ecosyst. Environ.* 67. 267–274.
- Mrabet, R., Ibn Namr, K., Bessam, F. & Saber, N., 2001. Soil chemical quality changes organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotation and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Land Degrad. Dev.* 12.505-517.
- Mrabet, R., 2002. Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. *Soil Till. Res.* 66.119-128.
- Mrabet, R., 2008. No-Tillage systems for sustainable dry land agriculture in Morocco. INRA Publication. Fanigraph (eds). Rabat, Maroc.153 p.
- Mrabet R., Moussadek R , Fadlaoui A. & Van Ranst E. 2011. Conservation agriculture in dry areas of Morocco. *Field Crops Research*. In press
- Mulumba, L. N. & Lal, R., 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil Till. Res.* 98.106–111.
- Murthy, R. S., Bhattacharjee, J. C., Landey, R. J. & Pofali, R. M., 1982. Distribution, characteristics and classification of Vertisols. Pages 3-22 *in* Vertisols and rice soils of the tropics. 12th International Congress of Soil Science, New Delhi, India.
- Paustian , K., Elliott, E. T., Six J. & Hunt. H. W., 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48.147-163.

- Rees, H. W., Chow, T. L., Loro, P. J., Lovoie, J., Monteith, J. O. & Blaauw, A., 2002. Hay mulching to reduce runoff and soil loss under intensive potato production in Northwestern New Brunswick, Canada. *Can. J. Soil Sci.* 82. 249–258.
- Roose, E., Blavet, D., Sabir, M., Ouagga, T., Cheggour, A., Simonneaux, V., Oliver R., Ferrer, H., Louri, J. & Chotte, J. L., 2008. Influence de l'utilisation d'un sol brun vertique sur les stocks de carbone du sol, les risques de ruissellement et d'érosion et le devenir du carbone érodé (bassin de l'oued Rheraya, Haut-Atlas, Maroc). Pages 317-324 in E. Roose and J. Albergel (eds). *Efficacité de la GCES en milieux semi-arides*. AUF, EAC et IRD éditeurs, Paris.
- Roose, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédologique, FAO*, no. 70, Rome, 420 p.
- Ruan, H., Ahuja, L. R., Green, T. R. & Benjamin, J. G., 2001. Residue cover and surface sealing. Effects on infiltration. Numerical simulation for field application. *Soil Sci. Soc. A. J.* 65.853-861.
- Saroa, G. S. & Lal, R., 2003. Soil restorative effects of mulching on aggregation and carbon sequestration in a Miamian soil in Central Ohio. *Land Degrad. Dev.* 14. 481–493.

Chapitre 4. Effet du labour et la gestion des résidus sur les propriétés hydrodynamiques et mécaniques d'un Vertisol Méditerranéen

Ce chapitre est adapté à partir d'un article suivant:

Moussadek, R., Mrabet, R., Verdoodt, A. Cornelis, W. & Van Ranst, E. 2012 **'Influence of tillage and residues management on soil hydrodynamic and mechanical properties of a Mediterranean Vertisol'**, qui sera soumis dans le Journal 'Soil Use and Management'.

Influence of tillage and residues management on soil hydrodynamic and mechanical properties of a Mediterranean Vertisol

Abstract

Vertisols are among the most productive soils in Morocco, but they are also susceptible to soil compaction and reduced water infiltration due to intensive tillage. No tillage (NT) is commonly promoted as a practice capable of offsetting soil carbon depletion, improving aggregation, enriching soil nutrient pool and enhancing wheat productivity of these heavy clay soils in semiarid Morocco. However, the influence of this system as compared to conventional tillage (CT) system on hydrodynamic and mechanical properties was not yet well studied in the semiarid environment of Morocco. The objective of this study was to investigate the effects of different tillage practices (CT, NT with 50% of residue cover (NT50) and NT without residue (NT0)) on bulk density (D_b), soil strength assessed using cone index (CI), hydraulic conductivity (K), sorptivity (S) and soil water potential (ψ) of a semiarid Mediterranean Vertisol. A long term NT field experiment was launched in October 2004 and the measurements reported in this study were carried out halfway the wheat growing season of 2008-2009 and 2010-2011. D_b was lower in CT than in NT treatments. K near saturation measured using a disk infiltrometer was higher or equal in CT than NT50, but always higher than NT0, whereas S was always higher in CT than both NT treatments. This might be due to soil compaction which was found to be higher in NT treatments than CT. Nevertheless, the presence of residue cover contributed to maintain more soil moisture under NT. It, therefore, seems very important not to remove residues after harvesting if NT is used on clay soils as Vertisols in semiarid area, in order to favour the beneficial effect on soil water storage.

Key Words. No-tillage; Crop residues; Hydraulic properties; Mechanical impedance; Soil water; Vertisols.

4.1. Introduction

Erratic and variable rainfalls are the major risks for farmers in semiarid environments of Morocco. In the last decades, prolonged droughts were reported in 1979-84, 1994-95, 1998-99 (Balaghi et al., 2006) and recently in 2006-07. The agricultural sector is highly sensitive to climate change and subjected to recurrent droughts, especially to mid-season droughts which seriously affect crop production (Bouzza, 1990; Kacemi et al., 1996).

In such semiarid regions, efforts have been focused on improving soil water availability and water use efficiency by increasing water infiltration into the soil and/or by minimizing the moisture loss through evaporation and runoff (Cooper et al., 1987; Hatfield et al., 2001; Dimanche & Hoogmoed, 2002; Ryan et al., 2006; Rockström et al., 2009). Soil management systems that have shown their potential with regard to soil water conservation include conservation tillage practices, such as no-tillage (NT) system (Hobbs, 2007). In fact, no tillage is gaining importance worldwide, reaching 100 million hectares (Derpsch, 2005). Reducing the impact of drought through the use of appropriate soil moisture conservation practices has been the major driving force for this increased adoption and acceptance of no tillage systems in semiarid areas (Hussein & Adey, 2001).

Characterising hydrodynamic properties, such as hydraulic conductivity (K), under different soil conditions, residues management and tillage practices is necessary to define sustainable management in semiarid environments (Moreno et al., 1997; Blanco-Canqui & Lal, 2007). Application of NT has been shown to have a great impact on infiltration properties, but with variable results depending on soil conditions (Green et al., 2003). Karlen et al. (1994) found no significant difference in soil hydraulic conductivity (K) under NT corn with straws maintained, removed, and doubled in a 10-year study on silt loam soils. Conversely, Findeling et al. (2003), in a 4-year study, showed that K in NT increased linearly with increasing rates of residue cover on a sandy loam. These findings were supported by Shaver et al. (2002).

Other researchers found, however, lower values of K in NT treatment compared to CT (Evet et al., 1999; Miller et al., 1998) due to the high bulk density observed under no-tillage treatments (Cassel et al., 1995; D'Haene et al., 2008). However, for Vertisols, contrasting observations are found in literature with respect to the effect of conservation agriculture on bulk density. Erkossa et al. (2007) and Habtegebrial et al. (2007) found no change in bulk density due to NT, whereas Roldan et al. (2007) reported an increase of bulk density under NT.

These contradictory results illustrate the need for further research on these topics taking into account the effect of NT and local conditions on hydrodynamic soil properties. In fact, to understand the effect of NT on soil moisture, one has also to study the behaviour of these soils under contrasting compaction and climate conditions (Lal et al., 1989; Syers et al., 2001; Mrabet, 2002). In addition, knowledge on soil hydrodynamic parameters under different tillage and cropping systems is becoming crucial for modelling water dynamics, crop development, crop yield and for simulating yield trends (Angulo-Jaramillo et al., 2000).

In spite of the large number of field researches conducted in semiarid areas in Morocco, studies on the effect of NT and residue management on mechanical and hydrodynamic properties of Vertisols are very scarce (Mrabet, 2008). In fact, Vertisols, also referred to as Tirs, are important soil types for the agricultural industry in the country and they are a major soil resource for the production of both feed and food crops (Mrabet, 1989). Due to their particular mineralogical and rheological properties, Vertisols or soils with vertic properties are generally very sensitive to compaction induced by tillage practices (Yule & Willcocks, 1996) and soil water shortage (Osman, 1987).

This study reports the effect of NT systems and residue management on mechanical and hydrodynamic parameters of a Vertisol in semi-arid Morocco. Soil properties were assessed in the mid-season period of wheat in two different years (March 2009 and April 2011) on fields

under conventional tillage (CT), NT with 50 % of residues (NT50) and NT without residue (NT0). The following parameters were measured using relevant instrumentation: (i) bulk density, (ii) soil strength, (iii) near saturated soil hydraulic conductivity, (iv) sorptivity and (v) soil water potential.

4.2. Materials and methods

4.2.1. Location, climate and soil

The experiment was established at the Merchouch research station of the National Institute of Agricultural Research (INRA), located 60 km south of Rabat (Latitude 20°17 S and Longitude 52°25 W). The mean annual precipitation and temperature are 380 mm and 23°C respectively. Monthly average precipitation and temperature during the selected cropping seasons (2008-2009 and 2010-2011) as well as the long-term (40-year) averages are shown in figure 4.1.

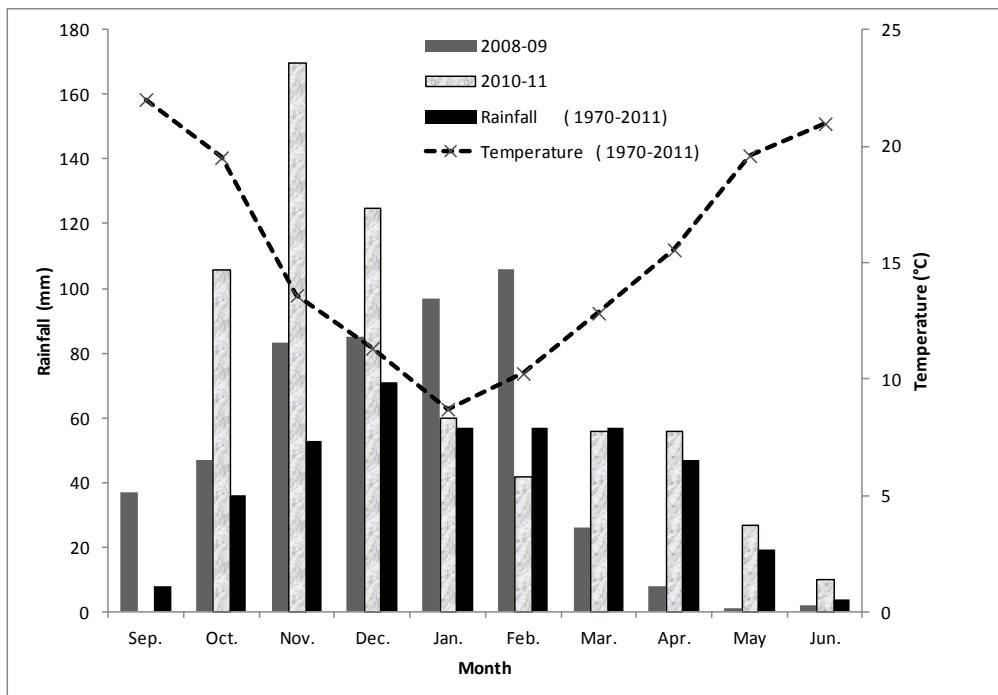


Fig.4.1. Long-term monthly average temperature, rainfall (1970-2011) and monthly average rainfall during experimental seasons (2008-2009 and 2010-2011) in the study area

Compared to the long-term average rainfall amounts, the first months of the experimental cropping seasons, corresponding to the initiation and vegetative wheat growth stages, were relatively wet; whereas, in 2008-2009 season, the months of the reproductive and maturation stages were relatively dry.

The experimental site is characterised by a flat topography and is dominated by poorly drained, slightly alkaline, and self-mulching Chromic Calcixererts with low organic matter contents but adequate P and K levels in the surface horizons (Table 4.1).

Tab.4.1 . Selected soil properties at the start of the experiment (2004)

Depth (cm)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	pH water	Organic matter (%)	P ₂ O ₅ (mg.kg ⁻¹)	K ₂ O (mg.kg ⁻¹)	Soil-water content at -33 kPa (m ³ m ⁻³)	Soil-water content at -1500 kPa (m ³ m ⁻³)
0-20	50.0	37.3	12.7	7.8	1.9	20	323	0,39	0,17
20-40	51.3	38.2	10.5	8.3	1.4	4	184	0,41	0,18
40-90	52.5	35.1	12.4	8.6	1.2	1	144	0,43	0,21

The study was initiated in the fall of 2004. It is intended to be continued for a long period of time in order to study short as well as long-term influences of tillage systems on soil quality and crop productivity.

4.2.2. Experiment layout and treatments

The experiment comprised two tillage systems: conventional tillage (CT) and no tillage (NT). Each system was assigned to a plot of 100 m by 200 m in order to consider spatial variability. The conventional tillage systems consisted of summer tillage based upon deep soil and stubble inversing with a disk plow, followed by chiselling and two passes with an off-set disk in order to obtain a fine seedbed.

Under NT, the only manipulation was soil disturbance in a narrow slot created by coulters and hoe openers attached to a drill, when seeds and fertilizers were placed. All plots received the same crop management (rotation, variety, seeding rate, fertilizer dose and type). The rotation

was adopted wheat-lentil. For wheat (Errihane variety), the plots received the same seeding dose (0.14 t ha^{-1}) and the same dose of fertilizers (0.15 t ha^{-1}) of complex type (14-28-14, i.e., 14% N, 28% P and 14% K). As for the lentil (Bakria variety), the seed rate was 0.04 t ha^{-1} and the amount of fertilizer was 0.10 t ha^{-1} of complex type (14-28-14).

To study the effect of residue management on soil properties under no-till, the NT plot was subdivided into two parcels of 1 ha for four years (June 2007-June 2011). At harvest, all residues had been removed in the first sub plot (NT0), whereas only half of the residue was removed in the second one. In fact, after collecting the total quantity of residues in the NT0 sub plot, the harvest machine was adjusted to remove only 50% of the residues in the second sub plot (NT50), leaving the rest of residue on the field.

4.2.3. Measurements

The hydrodynamic behavior of the Vertisol under the 3 different treatments was characterized by daily measurements of the soil matrix potential during the reproductive stage of wheat (from 20 February 2009 to 20 April 2009 for the 2008-2009 cropping season, and from 31 March 2011 to 25 May 2011 for the 2010-2011 cropping season). The hydraulic conductivity and sorptivity under near saturated conditions, as well as the soil bulk density, soil moisture content and penetration resistance, reflecting its mechanical behavior, were determined during the mid-season of the wheat growing period, i.e., on March 10, 2009 and April 15, 2011

4.2.3.1. Soil bulk density and moisture

Changes of soil water content due to tillage systems were monitored at different depths using a gravimetric method. The volumetric soil water content was calculated from bulk density and the gravimetric soil water. Intact soil cores of 200 cm^3 in metal sleeves were collected from 0-15 cm and 15-30 cm depth intervals using a hammer-driven core sampler for the determination of dry bulk density (ρ_b) (Grossman and Reins, 2002). Bulk density was

calculated as the ratio of oven-dry weight to total volume of the sampled soil. In each treatment, samples were taken at five randomly selected locations per depth.

4.2.3.2. Soil strength

The cone index CI (or soil penetration resistance) is an empirical measure of soil strength that can rapidly identify areas where soil compaction may be limiting crop production (Bitzer et al., 1996; Kitchen et al., 1999; Castrignanò et al., 2002). Soil strength was measured over the top 30 cm of the profile at ten randomly located points in each of the three treatments using a Rimik CP-20 cone penetrometer (base area 2 cm², angle 60 degree). At each point, soil water content was determined by the gravimetric method in order to account for the effect of soil moisture on soil strength.

4. 2.3.3. Hydraulic conductivity and sorptivity

Disc (or tension) infiltrometer have been used extensively to determine soil hydraulic properties (e.g., Joel & Messing, 2000; Abrisqueta et al., 2006; Baetens et al., 2009; Verbist et al., 2009). It was used to determine in situ the hydraulic conductivity and sorptivity in a range of near soil water saturations (Smettem & Clothier, 1989). Measurements were conducted at five randomly located points in each treatment under a sequence of nominal negative pressures (-140 mm, -40 mm and -5 mm). Prior to each measurement, the soil surface was prepared by carefully removing mulch and any aboveground plant material. By using a layer of contact sand, a good and consistent hydraulic contact between the infiltrometer membrane and the soil was maintained at all times in order to obtain reliable results (Reynolds & Zebchuk, 1996).

To determine the soil hydrodynamic properties (hydraulic conductivity and sorptivity), the disc infiltrometer approach developed by White and Sully (1987) and Ankeny et al. (1991)

was used. It applies Wooding's (1968) equation to describe the unconfined flow of water from a disc:

$$Q = \pi r^2 K + 4r\Phi_m \quad (1)$$

Where Q [$L^3 T^{-1}$] is the volume flux, K [$L T^{-1}$] is the hydraulic conductivity, ϕ [$L^2 T^{-1}$] is the water flux potential and r [L] is the disc radius.

Ankeny et al. (1991) used Eq. (1) and measured the infiltration rate (i.e., volume flux Q over flow area πr^2) at two pressure heads h_1 and h_2 . This resulted in two equations with four unknowns:

$$\begin{aligned} Q(h_1) &= \pi r^2 K(h_1) + 4r\Phi_m(h_1) \\ Q(h_2) &= \pi r^2 K(h_2) + 4r\Phi_m(h_2) \end{aligned} \quad (3)$$

In order to solve these equations, two other equations were used. The first was based on Philip's (1985) assumption of a constant relationship between K and Φ :

$$\frac{K(h)}{\Phi(h)} = \text{constant} \quad (4)$$

The second equation used by Ankeny et al. (1991), considers the relationship between K and h :

$$\begin{aligned} Q(h_1) &= \left(1 + \frac{4}{\alpha \pi r^2}\right) K(h_1) \\ Q(h_2) &= \left(1 + \frac{4}{\alpha \pi r^2}\right) K(h_2) \end{aligned} \quad (5)$$

Where α is the sorptivity coefficient:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{Q(h_1)}{Q(h_2)}\right)}{h_1 - h_2} \quad (6)$$

K was then solved for pairs of unconfined infiltration rates taken at two different pressure heads, i.e. at -5 and -40 mm and at -40 and -140 mm, yielding one K value at -5 mm and at -140 mm, and two K values at -40 mm. To have a single K value at -40 mm, the arithmetic mean of both K values was calculated (Ankeny et al., 1991). Finally, the geometric mean of five replications was calculated.

Sorptivity was calculated according to White and Sully (1987):

$$S_i^2 = \frac{\Phi_i(\theta_0 - \theta_f)}{b} \quad (7)$$

Where θ_0 and θ_f were the initial and final soil water content respectively, b is a constant, usually taken at 0.55 (Warrick & Broadbridge., 1992), and i refers to the imposed pressure heads.

Soil water dynamics

Temporal soil water dynamics were characterized by monitoring soil water potentials (SWP) in each treatment from 20 February 2009 to 20 April 2009 and from 31 March 2011 to 25 May 2011 using the Watermark sensors or granular matrix sensors (Model 200SS, Irrrometer Co., Riverside CA, USA). They measure soil water potential indirectly based on electrical resistance and have a relatively wide working range (0 to -200 kPa). These sensors are considered to be satisfactory for indicating relative soil water wetness (Shock, 2003; Bertolino et al., 2010).

Three Watermark sensors and one soil temperature probe (Model 200TS, Irrrometer Co., Riverside CA, USA) were installed at a depth of 20 cm randomly in each treatment. Daily readings were recorded using 3 dataloggers.

4.2.4. Statistical analysis

The effect of three treatments (CT, NT0 and NT50) on the selected soil properties was tested by using analysis of variance (ANOVA) and by Least Significant Difference (LSD) for comparison of means (with significance at 5%) using SPSS (v.17).

4.3. Results and discussion

4.3.1. Soil bulk density and moisture

Results of bulk density (D_b) measured during the selected periods are shown in table 4.2.

Tab.4.2. Bulk density (D_b) measured at selected date during wheat mid-growing seasons in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50)

Date	Depth (cm)	D_b (Mg m ⁻³)		
		CT	NT0	NT50
10 March 2009	0-15	1,25 b	1,49 a	1,45 a
	15-30	1,30 b	1,53 a	1,46 a
15 April 2011	0-15	1,31 c	1,47 a	1,40 b
	15-30	1,33 b	1,51 a	1,49 a

Values of D_b in each line with the same letter are not significantly different ($P < 0,05$) (LSD test)

After four years of implementing the practices (2009), bulk density was significantly different in the treatments, being higher in both NT treatments than in CT and no significant difference was observed between NT treatments. The same result was observed after six years (2011) and D_b density at 0-30 cm in CT was lower than both NT treatments, but at 0-15 cm, D_b under NT0 was significantly higher than under NT50. From these results, it seems that the bulk density (D_b) was always higher in the NT treatments than in CT, as has been observed by other authors (Logsdon & Jaynes, 1993; Hernanz et al., 2002) and in a concurrent study in the same Vertisol (Moussadek et al., 2011). Our results further indicate that in both NT treatments, D_b did not decrease with time after few years of the establishment of the

experiments. This is not in agreement with results of Moreno et al. (1997) which showed that only 3 years were required in soil under NT to reach the same D_b as under CT. It seems that decreasing D_b in this semiarid Vertisol under NT needs more time and that it might be more related to biological activity which could improve the soil porosity (Jordan et al. 2010). In fact, on 15 April 2011, D_b under NT50 was lower at 0-15 cm depth than NT0 and this could be explained by the existence of bio-pores created by an increase of the earthworm population under residues which was visually observed when soil was sampled during this period. Many authors indicated the positive effect of earthworms under NT with residues on soil porosity (Moreno et al., 1997; Blanco-Canqui & Lal, 2007).

Concerning the soil moisture measured in the same period as D_b , no significant difference was observed between treatments at the first date (Table 4.3) but in the second period, CT had a significantly lower volumetric water content compared to NT0 and NT50. The amount of rainfall during the growing season, affecting the soil water storage, and the high values of D_b observed in NT treatments compared to CT (Table 4.2), could explain these findings.

Tab.4.3. Volumetric water content (θ) measured at selected date during wheat mid-growing seasons in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50)

Date	Depth (cm)	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		
		CT	NT0	NT50
10 March 2009	0-15	0,219 a	0,209 a	0,211 a
	15-30	0,201 a	0,198 a	0,204 a
15 April 2011	0-15	0,234 b	0,273 a	0,288 a
	15-30	0,241 b	0,276 a	0,268 a

Values of θ in each line with the same letter are not significantly different ($P < 0,05$) (LSD test)

4.3.2. Soil strength

At mid growing wheat period, soil compaction under treatments was assessed along the 0-30 cm soil profile in 2009 and 2011 (Fig.4.2 and 4.3). The results of cone index (CI) showed that on 10 March 2009, CI was significantly higher under both NT treatments compared to CT. The soil water content (θ) at this time was the same in all treatments (Table 4.3).

The same result was observed on 15 April 2011. CT treatment exhibited a lower value of CI over the top 30 cm compared to NT plots. However, at 0-10 cm soil depth, NT0 presented a significantly higher value of CI compared to NT50.

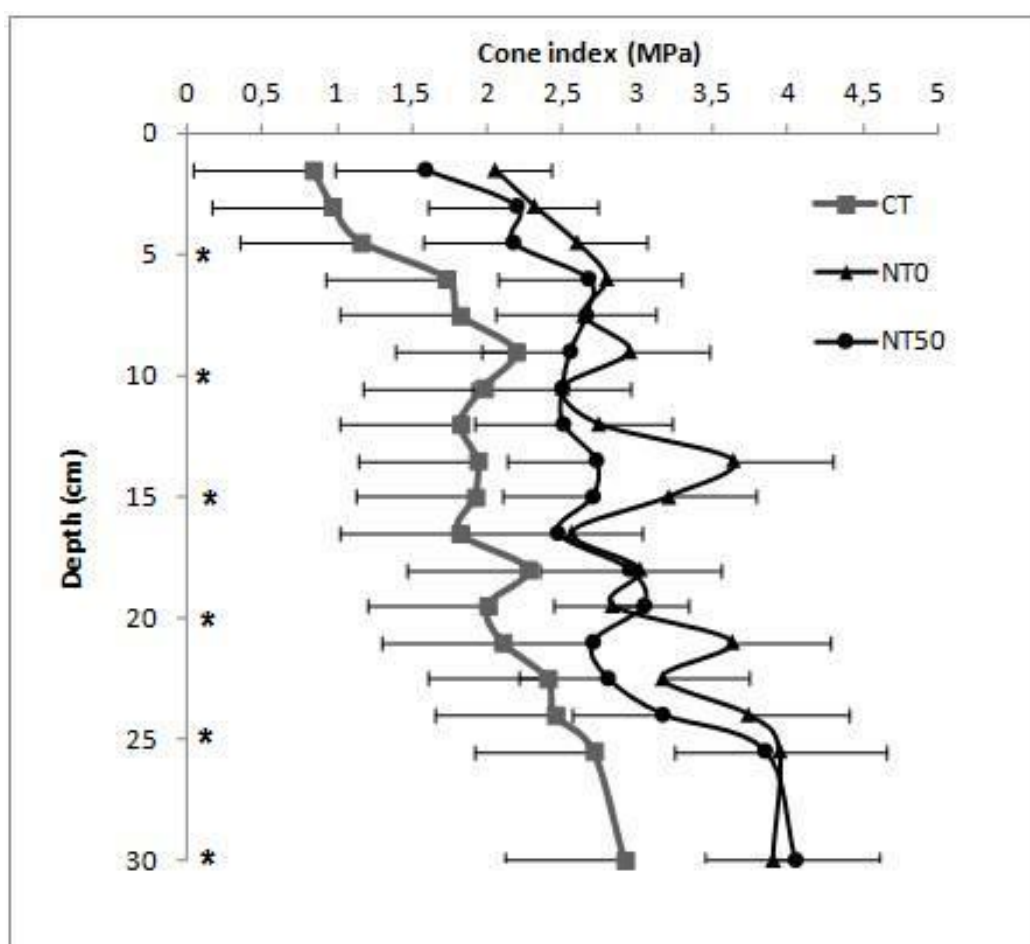


Fig.4.2. Soil strength, measured on March 10, 2009, in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50, respectively) (* means significant difference between treatments; error bars indicate standard error) ($P < 0.05$; LSD test)

At this time, θ was significantly similar in NT50 ($0.27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) compared to NT0, but higher than CT ($0.23 \text{ m}^3 \text{ cm}^{-3}$). The increase of soil strength under NT treatments, compared to CT, was reported by Lamperlanés & Cantero-Martinez (2003) and Soane et al. (2012) in different edaphic environments.

In the second period, the significant difference observed on soil strength in NT treatments at 0-10 cm depth, could be due, as mentioned before, to biological activity (earthworm) under residues in NT50. Many authors reported the increase of the earthworm density in NT with residues which reduce the soil strength compared to NT without cover crop (Mele & Carter, 1999; Pelosi et al., 2009).

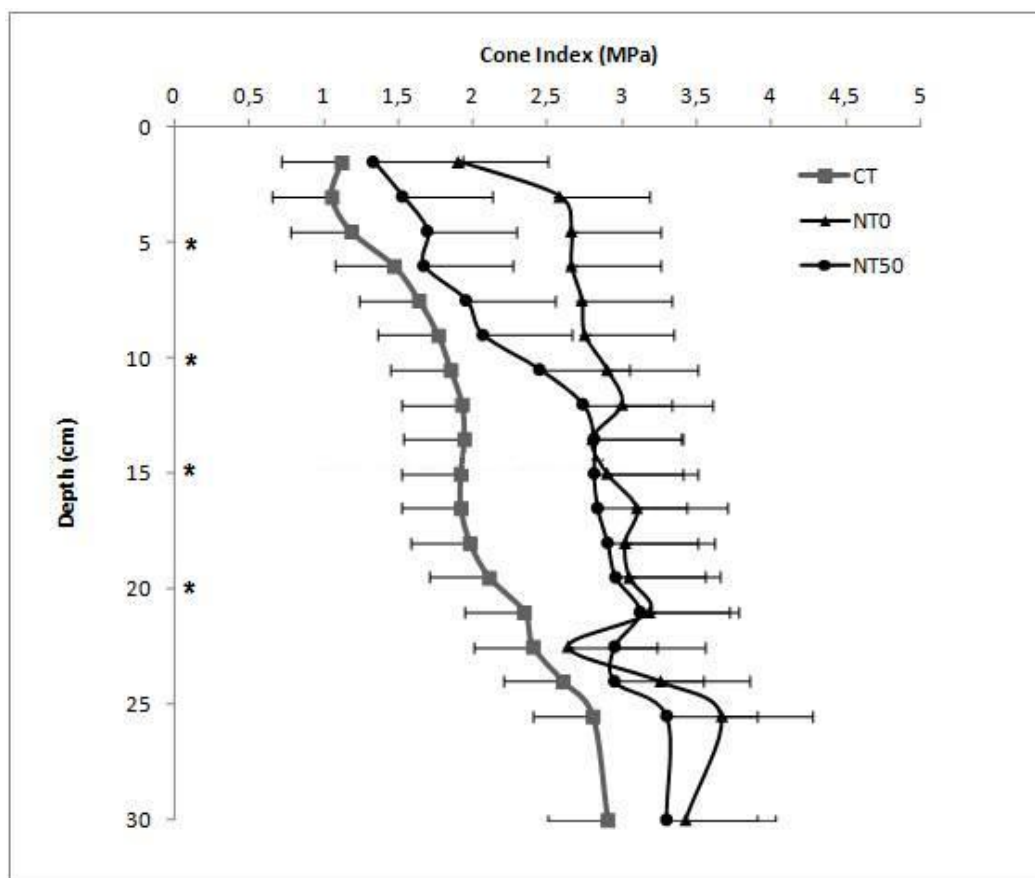


Fig.4.3. Soil strength, measured on April 15, 2011, in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50, respectively) (* means significant difference between treatments; error bars indicate standard error) ($P < 0.05$; LSD test)

4.3.3. Hydraulic conductivity

Hydraulic conductivity data of the soil surface in the CT, NT0 and NT50 treatments are shown in table 4.4.

On 10 March 2009, the effect of tillage practices on K was significantly different. In fact K was significantly greater in CT compared to NT0 and NT50. These results are in agreement with findings reported by Lamperlanés & Cantero-Martinez (2006) who found that in semiarid Spain NT had lower K, at near saturation, than CT practices in spite of having more residue cover. These results could be explained by the high bulk density observed in the surface layer of the soil in this period in the NT plots which reduced the hydraulic conductivity (Moreno et al., 1997; Miller et al., 1998; Evett et al., 1999). In particular, CT is expected to have more water transmitting macropores compared to NT practices (except for the larger biopores created by earthworms in NT50 which were most probably excluded from water flow at pressures of -5 mm or lower).

Tab.4.4. Hydraulic conductivity (K) and Sorptivity (S) of the soil surface measured at different pressure heads (h) on selected dates during wheat mid-growing seasons in conventional tillage (CT), no-tillage without and with 50 % residues cover (NT0 and NT50, respectively)

Date	h (mm)	K (mm h ⁻¹)			S (mm h ^{-1/2})		
		CT	NT0	NT50	CT	NT0	NT50
10 March 2009	-5	118,5 a	79,2 b	75,6 b	49,5 A	37,2 B	40,7 B
	-40	45,9 a	33,4 b	31,7 b	38,6 A	33,1 B	30,3 B
	-140	7,2 a	3,8 b	2,6 b	17,7 A	8,6 B	9,6 B
15 April 2011	-5	90,1 a	64,4 b	83,7 a	37,1 A	31,3 B	28,5 B
	-40	37,4 a	20,5 c	25,5 b	30,1 A	26,3 B	21,4 C
	-140	8,3 a	4,7 b	5,1 b	12,8 A	8,3 B	7,1 B

Values of K and S in each line with the same letter are not significantly different (P<0,05) (LSD test)

However, on 15 April 2011, no significant difference was observed in K at pressure head of -5 mm between CT and NT50, although NT0 had a significant lower K value compared to CT and NT50. At pressure heads < -5 mm, K was higher in CT than both NT treatments. This result could be explained by the consolidated soil under NT treatments, compared to CT. The same findings were observed by Moret & Arruè (2007) and they reported that K at (-40 and -140 mm) was higher in CT than in NT because of the high percentage of mesopores created during tillage operation in CT plots.

4.3.4. Sorptivity

Sorptivity is a measure for the ability of soil to absorb water under capillary force and as such indicates the pore volumes being filled in the early stage of infiltration. Sorptivity was higher in CT than NT treatments at all pressure heads applied in both periods. The same result was obtained by López-Garrido et al. (2010) in semiarid Spain. Clothier (2000) explained this result by the fact that sorptivity is a definite integral of the diffusivity function (Eq. 7) and so it is affected by both the upper and the lower limit on the integral ($S=S(\theta_0, \theta_f)$). Simply because θ_0 of CT was lower (due to soil evaporation) than that of NT treatments, the sorptivity of the CT was higher. According to Shaver (2010), the effect of NT on sorptivity will be occurred during next years when soil bulk density decreased.

4.3.5. Soil water potential dynamics

The impact of tillage practices on soil water potential ψ is presented in figure 4.4. After rain events occurred in February 2009, ψ values at 20 cm depth of all treatments ranged from -45 to -65 kPa during the first decade of March 2009 (Fig. 4.4a). However, in the last decades of this month, ψ decreased much faster in CT compared to NT treatments, indicating that the soil dried faster under CT than under NT0 and NT50. These differences in soil water potential are

due to the lack of soil disturbance and presence of the residue cover which reduce soil evaporation in NT treatments.

As shown in figure 4.4b, during the first decade of April 2011, ψ values were similar in all treatments and ranged from -15 to -30 kPa but after this period, significant differences in soil water potential were observed between all treatments. NT50 had a higher value of ψ compared to CT and NT0 and these differences in soil water dynamics between the tillage systems persisted through this period. By the end of the April 2011, ψ reached a value of -200 kPa in CT treatment, corresponding to the Watermarks lower reading limit. Ψ of NT0 reached the same value one week later, whereas in NT50, this value was only reached this value 14 and 22 days later than NT0 and CT, respectively. Also in 2009, a similar trend was observed. It should be noted that at least once a soil water potential of -200 kPa was reached, the small rain events did not wet the soil at 20 cm depth.

Reduce soil disturbance and maintain residue cover could explain the higher soil water potential (less soil evaporation) that was found under NT in comparison with CT, since K was equal or lower, and bulk density was higher in NT than in CT. This result is consistent with findings in other studies (Lampurlanés et al., 2002; Lampurlanés & Cantero-Martínez, 2006; Blanco-Canqui & Lal, 2007; Jin et al., 2007) who observed positive effects of residue on soil water content under NT compared to CT.

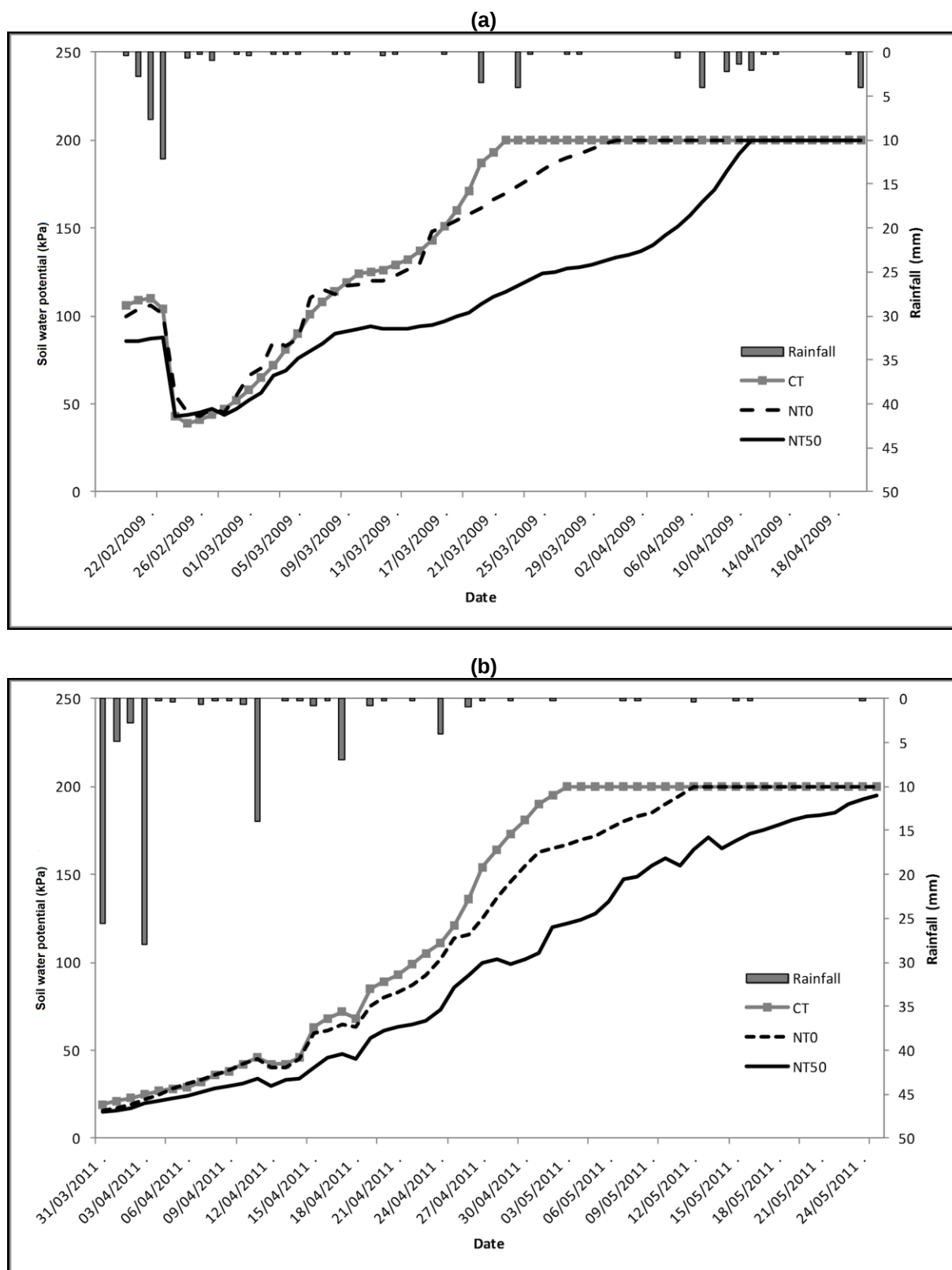


Fig.4.4. . Soil water potential ψ measured at 20 cm depth in conventional tillage (CT), no-tillage without residues (NT0) and tillage with 50% residues cover (NT50), during wheat mid-growing seasons a) in 2009 and b) in 2011.

4.4. Conclusions

No till, relative to traditional tillage practices, has given marked early differences in soil physical properties of a Vertisol in semi-arid Morocco. In this environment, conserving the residue cover on the soil surface, and thus reducing soil evaporation, resulted in more water in the NT soil profile. Soil compaction measured using a penetrometer was found to be higher in NT than in CT; this could be explained by the lack of soil disturbance due to tillage operation. This was also supported by higher bulk density values observed in NT practices. In terms of hydraulic conductivity, K near saturation was equal or higher in CT compared to NT50, whereas NT0 always showed a lower K value than CT.

It, therefore, seems very important not to remove residues after harvesting if NT is used in clay soils as Vertisols in semiarid areas, in order to favour the beneficial effects on soil moisture.

4.5. References

- Abrisqueta, J.M., Plana, V., J. A. Franco, J.A. & Ruiz-Sánchez, M.C., 2006. Effect of tillage and water pressure head on the hydraulic properties of a loamy soil surface. *Span. J. Agri. Res.* 4 (2), 180-186.
- Angulo-Jaramillo R., Vandervaere J.P., Roullet S., Thony J.L., Gaudet J.P. & Vauclin M., 2000. Field measurements of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. *Soil Till. Res.* 55, 1- 29.
- Ankeny, M.D., Ahmed M., Kaspar T.C., & Horton R., 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 467–469.
- Balaghi, R., Jlibene, M., Tychon, B. & Mrabet, R., 2006. Gestion du risque de sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse.* 18, 169-176.
- Baetens, J.M., Verbist, K., Cornelis, W.M., Gabriels, D. & Soto, G. 2009. On the influence of coarse fragments on soil water retention. *Water Resour. Res.* 45: W07408. 14 p.
- Bertolino, A. V.F.A., Nelson, F. F., Miranda, J. P.L., Souza, A. P., Lopes, M. R.S. & Palmieri, F., 2010. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. *J. Hydrol.* 393, 94-104.
- Bitzer, M. J., Barnhisel, R. I. & Grove, J. H., 1996. Varying corn populations according to depth of top soil. *Proceedings of the Information Agriculture Conference*, Urbana IL.
- Blanco-Canqui, H. & Lal, R., 2007. Impact of long-term wheat straw management on soil hydraulic properties under no-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1166–1173.
- Bouzza, A., 1990. Water conservation in wheat rotations under several management and tillage systems in semiarid areas. Ph. D. Thesis, University of Nebraska, Lincoln.
- Cassel, D. K., Raczkwaki, C. W. & Denton, H. P. 1995. Tillage effect on corn production and soil physical conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1436-1443.

- Castrignanò, A., Maiorana, M. & Fornaro, F., 2002. 3D spatial variability of soil strength and its change over time in a durum wheat field in Southern Italy. *Soil Till. Res.* 65, 95-108.
- Clothier, B. E., 2000. Infiltration. *In* Soil and environmental analysis. Physical methods. (eds) KA Smitha, CE Mullins. p. 239-280. Marcel Dekker. New York.
- Cooper, P.J.M., Gregory, P.J, Keatinge, J. D. G. & Brown, S.C., 1987. Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in Northern Syria. II . Soil water dynamics and crop water use. *Field Crop Res.* 16, 67-76.
- Derpsch, R., 2005. The extent of Conservation Agriculture adoption worldwide. Implications and impact. *In* Linking Production, Livelihoods and Conservation. proceedings of the third World Congress on conservation agriculture, Nairobi, Kenya, 3-7 October 2005, 15p.
- D'Haene, K., Vermang, J., Cornelis, W. M., Leroy, B. L. M., Schiettecatte, W., DeNeve, S., Gabriels, D. & Hofman, G. 2008. Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils and growing root crops. *Soil Till. Res.* 99(2), 279-290.
- Dimanche, P.H. & Hoogmoed, W.B., 2002. Soil tillage and water infiltration in semi-arid Morocco. The role of surface and sub-surface soil conditions. *Soil Till. Res.* 66. 13 - 21.
- Erkossa, T., Itanna, F., & Stahr, K. 2007. Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. *Aus. J. Soil Res.* 45(2), 129-137.
- Evelt, S.R., Peters, F.H., Jones, O.R. & Unger, P.W., 1999. Soil hydraulic conductivity and retention curves from tension infiltrometer and laboratory data. *In*: van Genuchten, M. T., Leij, F.J., Wu, L. (Eds.), *Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Part 1*, USDA, Riverside, California, pp. 541-551.
- Findeling, A., Ruy, S. & Scopel, E., 2003. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *J. Hydrol.* 275, 49-66.
- Green, R.T., Ahuja, L. R. & Benjamin, J. G., 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma* 116, 3-27.

- Grossman, R.B. & Reinsch, T.G., 2002. Bulk density and linear extensibility. In. Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Agron. Monogr. 5. SSSA, Madison, WI*, p. 201-225.
- Habtegebrial, K., Sing, B. R. & Haile, M. 2007. Impact of tillage and nitrogen fertilization on yield, nitrogen use efficiency of tef (*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter) and soil properties. *Soil Till. Res.* 94 (1), 55 - 63.
- Hatfield, J.L., Sauer, T.J. & Prueger, J.H., 2001. Managing soils to achieve greater water use efficiency. A review. *Agron. J.* 93, 271-280.
- Hernanz, J.L., López, R., Navarrete, L. & Sánchez-Girón, V. 2002. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *Soil Till. Res.* 66, 129-141.
- Hobbs, P.R., 2007. Conservation agriculture. What is it and why is it important for future sustainable food production? *J. Agri. Sci.* 145, 127-137.
- Hussein, J & Adey, M. 2001. Soil and water conservation strategies for Vertisols: past experiences and challenges ahead for Africa. in Syers, J. K., Penningde Vries, F. T., Nyamudeza, P., (Eds.). *The Sustainable Management of Vertisols*. CAB International Publishing, p. 21-42.
- Jin, K., Cornelis, W.M, Schiettecatte, W., Lu, J.J., Yao, Y.Y., Wu, H.J., Gabriels, D., De Neve, S., Cai, D.X., Jin, J.Y. & Hartmann, R. 2007. Effects of different management practices on the soil–water balance and crop yield for improved dryland farming in the Chinese Loess Plateau. *Soil Till. Res.* 96, 131–144.
- Joel, A. & Messing, I., (2000) Application of two methods to determine hydraulic conductivity with disc permeameter on sloping land. *Euro. J. Soil Sci.* 51, 93-98.
- Jordan, A., Zavala, L. M. & Gil, J. 2010. Effect of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena.* 81, 77-65.

- Kacemi, M., Peterson, G.A. & Mrabet, R., 1996. Water conservation, wheat-crop rotations and conservation tillage systems in a turbulent Moroccan semi -arid agriculture. Actes de conference. Acquis et perspectives de la recherche agronomique dans les zones arides et semi-arides du Maroc. INRA-MIAC (eds). 1994, 83-91.
- Karlen, D.L., Wollenhaupt, N.C., Erbach, D.C., Berry, E.C., Swan, J.B., Eash, N.S. & Jordahl, J.L., 1994. Crop residue effects on soil quality following 10 years of no-till corn. *Soil Till. Res.* 31, 149–167.
- Kitchen, N.R., Sudduth K.A. & Drummond S.T., 1999. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. *J. Prod. Agri.* 12, 607-617.
- Lal, R., Hall, O.G., & Miller, F. P., 1989. Soil Degradation. I. Basic Processes. *Land Deg. Rehab.* 1, 51-69.
- Lampurlanés, J, Angas, P. & Cantero-Martinez, C., 2002. Tillage effects on water storage during fallow, and on barley root growth and yield in two contrasting soils of the semi-arid Segarra region in Spain. *Soil Till. Res.* 65, 207-220.
- Lampurlanés, J. & Cantero-Martinez, C., 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agron. J.* 95, 526–536.
- Lampurlanés, J. & Cantero-Martinez, C., 2006. Hydraulic conductivity, residue cover, and soil surface roughness under tillage systems in semi-arid conditions. *Soil Till. Res.* 85, 13–26.
- Logsdon, S.D. & Jaynes, D.B., 1993. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 1426-1431.
- López-Garrido, R. , López, M. V., Melero, S., Murillo , J. M., Girón, I., Madejón, E. & Moreno, F., 2010. Effect of tillage systems on soil aggregation and hydraulic properties in

SW Spain. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1- 6 August 2010, Brisbane, Australia.

Mele, P.M. & Carter, M.R., 1999. Impact of crop management factors in conservation tillage farming on earthworm density, age structure and species abundance in south-eastern Australia. *Soil Till. Res.* 50, 1-10.

Miller, J.J., Sweetland, N.J., Larney, F.J. & Volkmar, K.M., 1998. Unsaturated hydraulic conductivity of conventional and conservation tillage soils in southern Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 78, 643-648.

Moreno, F., Pelegrin, F., Fernandez, J.E. & Murillo, J.M., 1997. Soil physical properties, water depletion and crop development under traditional and conservation tillage in southern Spain. *Soil Till. Res.* 41, 25-42.

Moret, D. & Arrúe, J.L., 2007. Characterizing soil water-conducting macro- and mesoporosity as influenced by tillage using tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 500–506.

Moussadek, R., Mrabet, R., Zante, P., Lamachere, J-M., Pepin, Y., Le Bissonnais, Y., Ye, L., Verdoodt, A. & Van Ranst. E., 2011. Impact of tillage and residue management on the soil properties and water erosion of a Mediterranean Vertisol. *Can. J. Soil Sci.* 91(4), 627-635.

Mrabet, R., 1989. Contribution à l'étude du processus d'infiltration d'eau dans deux Vertisols. Mémoire d'Ingénieur Agronome, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, 148p.

Mrabet, R., 2002. Wheat yield and water use efficiency under contrasting residue and tillage management systems in a semiarid area of Morocco. *Experi. Agri.* 38, 237-248.

Mrabet, R., 2008. No-tillage systems for sustainable dry land agriculture in Morocco. INRA Publication. Fanigraph Edition, 153p.

Osman, A., 1987. Vertisol management systems in semi-arid Mediterranean areas. *IBSRAM Proc.* 6, 201-205.

- Pelosi, C., Bertrand, M. & Roger-Estrade, J., 2009. Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agron. Sust. Dev.* 29 (2), 287 – 295.
- Philip, L.R., 1985. Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil. *Water Resour. Res.* 21, 1025-1033.
- Reynolds, W.D. & Zebchuk, W.D., 1996. Hydraulic conductivity in a clay soil. Two measurement techniques and spatial characterization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 1679-1685.
- Rockström, J., Kaumbutho, P., Mwalley, J., Nzabi, A.W., Temesgen, M., Mawenya, L., Barron, J., Mutua, J. & Damgaard-Larsen, S., 2009. Conservation farming strategy in East and Southern Africa: yields and rainwater productivity from on-farm action research. *Soil Tillage Res.* 103, 23-32.
- Roldan, A., Salinas-Garcia, J. R., Alguacil, M. M., & Caravaca, F., 2007. Soil sustainability indicators following conservation tillage practices under subtropical maize and bean crops. *Soil Till. Res.* 93(2), 273-282.
- Ryan, J., de Pauw, E., Gomez, H. & Mrabet, R., 2006. Drylands of the Mediterranean Zone. Biophysical Resources and Cropping Systems. *In Dryland Agriculture* (2nd edition). G.A. Peterson et al. (eds). *Am. Soc. Agro. Mon.* 23, 577-624.
- Shaver, T., 2010. Crop Residue and Soil Physical Properties. *In Proceedings of the 22nd Annual Central Plains Irrigation Conference*, Kearney, NE., USA.
- Shaver, T., Peterson, G.A., Ahuja, L.R., Westfall, D.G., Sherrod, L.A. & Dunn, G., 2002. Surface soil physical properties after twelve years of dryland no-till management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1296-1303.
- Shock, C.C., 2003. Soil water potential measurement by granular matrix sensors. *In Stewart, B.A. & Howell T.A. Encyclopedia of Water Sciences*, Marcel Dekker (eds). 899-903.

- Smettem, K.R.J., & Clothier B.E., 1989. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disk permeameters. *J. Soil Sci.* 40, 563-568.
- Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F. & Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. 118, 66-87.
- Syers, J. K., Craswell, E. T. & Nyamudeza, P., 2001. Research needs and opportunities for farming Vertisols sustainability. In Syers, J. K., Penningde Vries, F. T., Nyamudeza, P., (Eds.). *The Sustainable Management of Vertisols*. CAB International Publishing, 283-290.
- Verbist, K., Baetens, J., Cornelis, W.M., Gabriels, D., Torres, C. & Soto, G. 2009. Hydraulic Conductivity as Influenced by Stoniness in Degraded Drylands of Chile. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 471-484.
- Warrick, A.W. & Broadbridge, P., 1992. Sorptivity and macroscopic capillary length relationships. *Water Resour. Res.* 28, 427-431.
- White, I. & Sully, M.J., 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.* 23, 1514-1522.
- Wooding, R.A., 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.* 4, 1259-1273.
- Yule, D.F & Willcocks, T.J., 1996. Tillage and cultural practices, *In* Ahmad, N. & Mermut, A. (eds.), *Vertisols and Technologies for Their Management*. Elsevier, Amsterdam, 261-296.

Chapitre 5. Impact du semis direct sur le stockage et qualité de la matière organique des sols du Maroc Central

Ce chapitre est adapté à partir d'un article intitulé:

Moussadek, R., Van Ranst, E., Mrabet, R., Verdoodt, A., Zouahri A. & Boulal, H. 2012. **'Impact of no-tillage on soil organic matter storage and quality in soils of Central Morocco'**; qui sera soumis dans le Journal 'Pedosphere'.

Impact of no-tillage on soil organic matter storage and quality in soils of Central Morocco

Abstract

Soil organic matter research is gaining momentum in order to explain and improve sustainability of production systems in the Mediterranean basin. Stabilizing or improving soil organic matter contents are vital for ensuring sustainable crop production against climate change. The aim of this paper is to study the effect of no tillage (NT) and conventional tillage (CT) on soil organic carbon (SOC) in three Mediterranean soil types (Vertisol, Cambisol and Luvisol) in Central Morocco. Also, chemical analyses were carried out to study the effect of NT and CT on humic substances. Our results showed that soil SOC stock measured 5 years after the introduction of no tillage system over 0-30 cm, varied among tillage system and soil type. The SOC stock was significantly higher in NT compared to CT (10 % more in Vertisol and 8% more in Cambisol). However, no significant difference between both tillage systems was observed in the Luvisol. At 0-30 cm depth, the SOC stock averages were 29.35 and 27.36 Mg ha⁻¹ under NT and CT respectively. The highest SOC stock (0-30 cm), 31.89 Mg ha⁻¹, was found in NT treatments in Vertisol soil type. Comparison of humic substance in this soil type showed that the effect of tillage systems varies regarding the components of humic substances. In fact, humic acids and humin were significantly higher under NT compared to CT; however fulvic acids were significantly lower in NT compared to CT. The results observed showed when shifting to no-tillage systems, Vertisols increased the SOC stock and improved the stability of humic substances.

Key Words: No-tillage, Soil organic carbon, Humic substance, Vertisols.

5.1. Introduction

Management of soil organic matter (SOM) in arable land has become increasingly important in many areas of the world in order to combat land degradation (Lal, 2006), increase food security (Swaminathan, 2000; Sanchez and Swaminathan, 2005), reduce C emissions and/or mitigate climate change (Lal, 2004).

In Morocco, previous studies have shown that the SOM content in most soils is low (<2%) and the decadal average (from 1987 to 1997) loss of the SOM due to intensive land use is about 30% (Soudi et al, 2003). The decline of SOM in cultivated soil of Morocco, due to the tillage intensification, decreased soil quality and increased the risk of soil degradation (Mrabet, 2003). In fact, FAO estimated that 71 % of Moroccan agricultural soils are degraded and require conservation measures (Ouassou et al., 2006).

To deal with this situation, conservation agriculture has been recommended as an alternative strategy to invert the soil degradation spiral in many parts of the world (Derpsch & Friedrich, 2009). In the Mediterranean basin, previous experiences have shown that no-tillage improves soil quality (Mrabet, 2010). In Spain, Alvaro-Fuentes et al. (2008) showed that no-tillage (NT) increases soil organic carbon (SOC) stock in the soil profile (0-40 cm) compared to CT. Similar results were found in Portugal (Basch, 2008), in Italy (Basso et al., 2002), in France (Oorts et al., 2007) and in Morocco (Mrabet, 1997; Mrabet et al., 2001; Moussadek et al., 2011). Although most studies reported that no-tillage increases SOC storage in the upper soil horizons compared to conventional tillage, others studies reported that SOC content, in deeper horizons, could be similar or even lower under NT than under conventional tillage (Mrabet, 2006). In fact, Franzluebbers (2004) reported that SOC stocks depend not only on tillage system, but also on local conditions (soil type and climate). SOM is a continuum of substances in all stages of decay. Furthermore, other investigations reported that NT systems not only affect the amount of SOM but also its quality either in terms of particulate organic

matter (Mrabet et al., 2001) or in terms of its composition of humic acids, fulvic acids and humin (MacCallister et al., 2000). These humic substances are involved in improving soil structural stability and plant growth (Madrid et al., 2004).

In Morocco, the effect of no-tillage on SOC content has been largely investigated (Mrabet, 2008), but studies on the potential storage of SOC under NT, taking into account the effect of soil types, have not been done. Furthermore, the previous studies did not assess the effect of NT on humic substances within this semi-arid environment. Hence, SOC chemistry remains uncharacterized under tillage systems for the most productive soils in Morocco, as Vertisols. Thus, the objectives of this study are:

[1] to investigate the effect of NT and CT on the SOC stock (SOCs) in three different soil types; and

[2] to quantify the effect of NT and CT on the composition of humic substances in selected Vertisols.

5.2. Material and methods

5.2.1. Research sites, experimental set-up and crop management

This study was conducted at the Merchouch plateau (33°34' N, 6°42' W and 425 m elevation), in Morocco. Its Mediterranean climate is characterised by a mean annual rainfall of 450 mm. Figure 5.1 shows the monthly time-series (1970-2010) of the average rainfall and temperature and those occurring during the studies period.

The experiment was established in autumn 2006 after harvest of wheat. Three sites with different soil types were selected. The soils of different sites were classified as Vertisol at site 1, Cambisol at site 2 and Luvisol at site 3, according to the WRB classification (WRB, 2006). Table 5.1 summarises the main soil characteristics of the soils at the 3 sites.

5.2.2. Experimental set-up

In each site, parcel of 2 hectares was subdivided into two equal plots (NT and CT) of 1 ha for four years (2007-2011). According to farmers' practice in the region, the CT plots were ploughed to a depth of 30 cm with a "stubble plow" at the end of August each year. This was followed by a pass of a chisel, operated at about 15 cm depth, and two passes with a disc harrow at about 10 cm depth during mid-September. The soil was not disturbed in the plots under NT. Wheat-lentil rotation was adopted and the crop management was similar in CT and NT treatments. Indeed, winter wheat was sown in mid-November at a 140 kg ha^{-1} seed rate. In mid-December, lentil was sown at seed rate of 40 kg ha^{-1} . Before sowing, wheat and lentil received a complex fertilizer ($14\text{N}-28\text{P}_2\text{O}_5-14\text{K}_2\text{O}$), at a rate of 150 kg ha^{-1} and 100 kg ha^{-1} , respectively. In addition, wheat received 100 kg ha^{-1} of urea at the end of February.

After harvest, about 30 % of the crop residues were maintained at the surface under no-tillage, while under conventional tillage, all crop residues were removed from the field according to the conventional farming practices of this region.

5.2.3. Soil sampling and analysis

5.2.3.1. Soil organic carbon content

In June 2011, after the wheat harvest, disturbed and undisturbed soil samples were taken for determination of the SOC content (SOC_c) and bulk density, respectively and in the same time. The soil samples were collected randomly from the three sites at four depths (0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm) in the NT and CT plots with three replicates per treatment.

Immediately after sampling, the soil was dry sieved at 2 mm to remove plant debris. The SOC content was determined indirectly by oxidation of organic carbon following the classical method of Walkley & Black (1934). The organic matter content is estimated by multiplying the SOC content by a correction factor of 1.724. Concerning the soil bulk density (D_b), the measurement was performed as described by Grossman & Reinsch (2002).

Tab.5.1. Selected soil characteristics at the different sites (Merchouch, Morocco)

Site / Soil	Depth (cm)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Texture class	pH (1.1 H ₂ O)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ₂ O (mg/kg)	CaCO ₃ total (%)	SOC (g/kg)
Site 1	0-20	49	29,5	21,5	C	7,02	21	234	3,6	12,2
Vertisol	20-80	52	26,6	21,4	C	7,23	11	133	7,3	11,4
	80-120	53	23,1	23,9	C	7,37	5	139	8,5	9,7
Site 2	0-25	44	37	18	C	7,9	58	237	1,2	11.7
Cambisol	25-55	41	49	10,0	SiC	7,8	5	133	4,4	11.1
	55-90	38	55	7,4	SiL	7,7	3	108	9,5	5,5
Site 3	0-15	19	36	45	L	7,1	40	259	5,5	7.4
Luvisol	15-50	25	28	47	L	7.2	14	129	10,5	6,5
	50-100	36	21	43	L	7.4	4	109	10,1	6,2

C. Clay; SiC. Silty Clay; SiL. Silty Loam; L.Loam (following the textural triangle, Soil Survey Staff. 1993)

5.2.3.2. Humic substances

To study the effect of tillage practices on humic substances, soil samples were collected randomly from the Vertisol at 0-20 cm depth in the NT and CT plots with three replicates per treatment in March 2011.

Extraction of humic substances was done using the alkaline solvents method (Piccolo, 1988). The fine fraction (<50 µm) was treated with 0.1 M sodium pyrophosphate at pH 9.8. From these alkaline substances, separated by centrifugation, the dispersed organo-mineral colloids were deflocculated with 4% KCl and mixed with insoluble soil residues. The residues were then treated with 0.1N sodium hydroxide at pH 12 using the same protocol (Dabin, 1976).

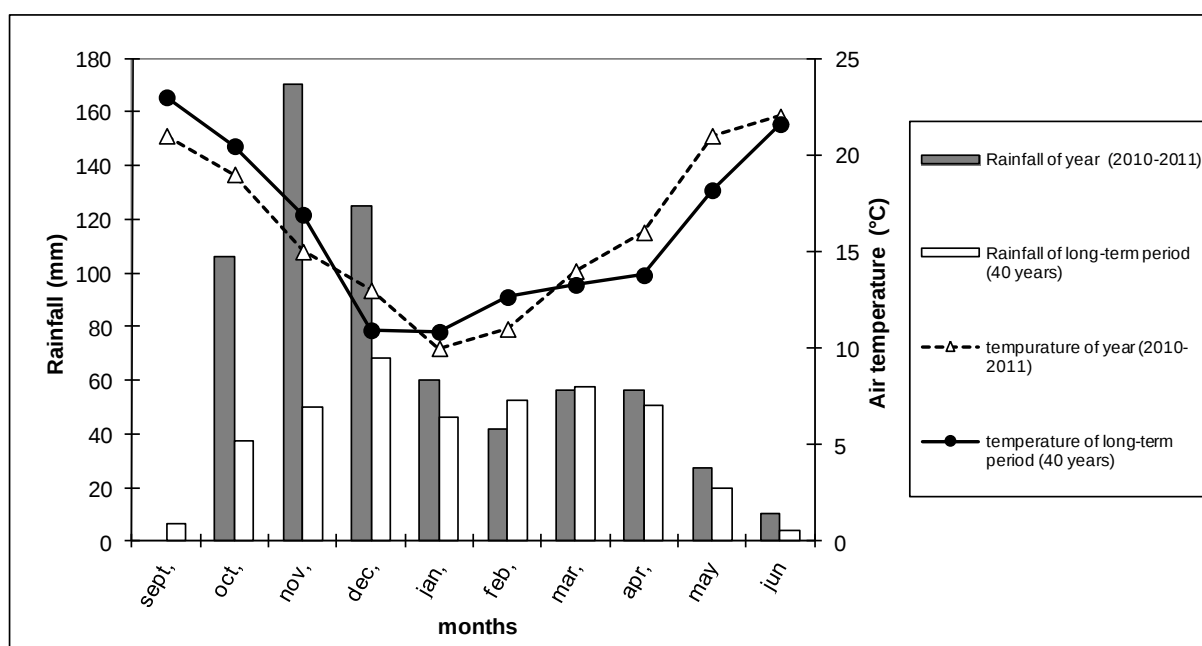


Fig.5.1. Monthly average of rainfall and temperature (2010-2011) at Merchouch compared to monthly values of a long-term period (1970-2011).

The pyrophosphate and NaOH extracts were mixed. The humic and fulvic acids were separated by acidification to a pH 1.5.

5.2.3.3. Calculation of soil organic carbon stock (SOCs)

The stock of soil organic carbon (SOCs) was expressed using the following equation (Bernoux et al., 2002):

$$\text{SOCs} = \sum_{i=1}^n D_{bi} * \text{SOC}_{ci} * D_i \quad (1)$$

where SOCs is the soil organic carbon stock (kg C m^{-2}), D_{bi} is the bulk density (Mg m^{-3}) of layer i , SOC_{ci} is the proportion of soil organic carbon content (g C g^{-1}) in layer i , D_i is the thickness of this layer (m).

5.2.3.4. Statistical analysis

The effects of tillage system on the SOC_{ci} , SOCs and humic substances were tested in the different soil types using SPSS version 17. Analysis of variance (ANOVA) was used to

determine significance of tillage effects in each soil type and *t*-test (Student test) was applied for comparing treatment means.

5.3. Results and discussion

5.3.1. Soil organic carbon content (SOCc)

Our results showed that the SOCc near the surface (0-10 cm) was significantly higher under NT compared to CT for the three soil types (Figure 5.2), confirming the results obtained by other authors under semi-arid Mediterranean conditions (Alvaro-Fuentes et al., 2008; Bescansa et al., 2006; Lopez-Bellido et al., 1997; Mrabet, 2008). The reduction of SOCc in conventionally tilled soil could be explained by the higher oxidation rate due to increased microbial activity at the soil surface (Karlen et al., 1994; Drijber et al., 2000). At 10-20 cm depth, except in Luvisol, SOCc was significantly higher in NT than CT. However, in the deepest horizon (20-30 cm), no significant difference of SOCc has been observed between the CT and NT systems. The same findings under similar semi-arid Mediterranean conditions were reported by Murillo et al. (1998), Moreno et al. (2006) and Mrabet (2008).

Although under semi-arid climatic conditions the potential for C sequestration into deep soil horizons is generally restricted, a slight increase of SOCc in the surface layer is essential to control erosion, water infiltration and conservation of nutrients, and is related with the soil quality (Franzluebbers, 2002).

5.3.2. Soil organic carbon storage (SOCs)

Figure 5.2 shows higher soil D_b under NT than under CT, especially in the top soil (except for Luvisol). Similar results were reported in numerous studies, which showed that bulk density increases in the few years after NT introduction (Cassel et al., 1995; Franzluebbers et al., 1995; Lampurlanés & Cantero-Martinez, 2003).

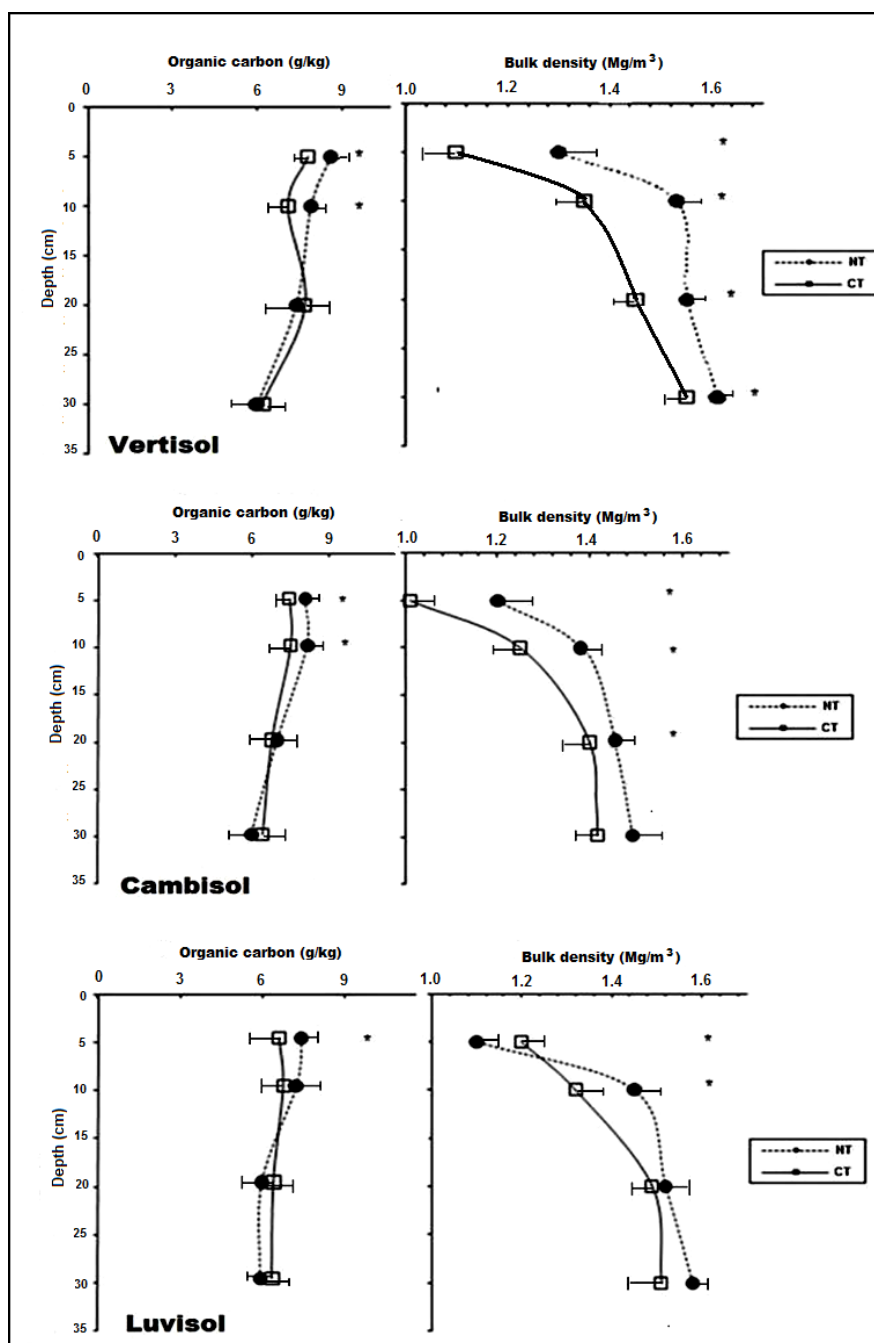


Fig.5.2. Soil organic carbon content (SOCc) and bulk density (Db) in three soil types after 5 years under NT and CT.

At each depth, (*) means the presence of significant differences between treatments (LSD test, $p < 0.05$). The error bar represent one standard error.

Many authors suggest that this increase in D_b under NT will be reduced with time following increases in soil biological activity (Dress et al., 1994; Jordan et al., 2010).

Table 5.2 shows the SOC_s in all layers for both tillage systems under the three soil types. The analysis of variance indicated significant higher SOC_s under NT compared to CT in both 0-5 and 5-10 cm layers under the three soil types. Considering the average SOC_s at 0-30 cm depth, NT had significant higher SOC_s than CT under Vertisol and Cambisol, however no significant difference was observed between the two tillage systems under Luvisol. The SOC_s (0-30 cm) average were 29.35 and 27.36 Mg ha⁻¹ under NT and CT, respectively, with a maximum of 31.89 Mg ha⁻¹ observed in NT under Vertisol.

Tab.5.2. Soil organic carbon storage (SOC_s) (Mg.ha⁻¹) in three sites under no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) in Merchouch, Morocco.

	Vertisol		Cambisol		Luvisol		Average	
Depth (cm)	NT	CT	NT	CT	NT	CT	NT	CT
0-5	5.39 a	4.14 b	4.91 a	4.07 b	4.02 a	3.31 b	4.77 a	3.84 b
5-10	5.83 a	4.62 b	5.70 a	4.63b	5.09 a	4.69b	5.54 a	4.65 b
10-20	11.32 a	10.77 b	10.35 a	9.81 b	8.54 a	8.61 a	10.07 a	9.73 a
20-30	9.34 a	9.26 a	9.80 a	9.98a	7.77 a	8.18 a	8.97 a	9.14 a
Total (0-30 cm)	31.89a	28.79 b	30.76 a	28.49 b	25.41a	24.79a	29.35 a	27.35 b

For the same soil and the same depth, treatments with same letter are not significantly different; Student test (p<0.05)

This result indicated that after five years under NT conditions in this semi-arid area of Morocco, the topsoil (0-30 cm) SOC_s increased by 10% in the Vertisol, 8% in the Cambisol but only slightly in the Luvisol (2%) compared to CT. This is consistent with the results of Ben Moussa-Machraoui et al. (2010) who observed an improvement of 12% of SOC_s in a Mediterranean Cambisol soil after 4 years of NT compared to CT.

Similarly, Mrabet (2003) observed a significant increase in SOC_s of a Vertisol after 4 years of NT compared to CT in semi-arid Morocco. In a long term study, Mrabet et al. (2001) reported

that SOC_s in Vertisol was 13.6 % higher under NT than under CT after 11 years under drier conditions compared to our study area.

In contrast, we didn't observe a significant effect of NT on (0-30 cm) SOC_s in the Luvisol, compared to CT. This is in agreement with results reported by Virto et al. (2007) and Thomas et al. (2007) in a Luvisol under semiarid climate. The higher C sequestration potential under NT of Vertisols and Cambisols versus Luvisols can be explained by differences in their texture. Several researchers have shown that fine-textured soils have a greater potential to sequester carbon than coarse-textured soils (Hassink, 1995; Needlman et al., 1999; Lal, 2004). In fact, soils with fine texture have higher SOC_s because of the stabilizing properties that clay has on organic matter which could be trapped in the very small spaces between clay particles making them inaccessible to micro-organisms and therefore slowing decomposition. Franzluebbers (2004) reported that soils with high clay content tend to have higher SOC than soils with low clay content under similar land use and climate conditions.

In this sense, Lal (1988) described Vertisols as "active" soils in NT due to the high amount of clay which could improve soil organic carbon content.

Concerning the organic carbon storage, SOC_s varied between 31.9 Mg.ha⁻¹ and 25.8 Mg.ha⁻¹ under NT, while in tilled treatments, SOC_s ranged between 28.8 Mg.ha⁻¹ and 24.8 Mg.ha⁻¹. These values were lower than those observed by Fernandez-Ugalde et al. (2009) who found, in silty clay soil, a SOC_s at (0-30 cm) of 50,9 Mg.ha⁻¹ after 7 years of no-tillage, which was significantly higher than the 44,1 Mg.ha⁻¹ under CT under wheat-barley cropping system in semiarid area in Spain. In the same Mediterranean climate, Hernanz et al. (2009) found, after 11 years under NT, a SOC_s of 37 Mg.ha⁻¹ which was higher than 33,5 Mg.ha⁻¹ under CT, using a wheat-vetch (*Vectoria sativa* L.) rotation in silty soil. The lower SOC_s values we observed can be explained by the fact that more time is needed before achieving the peak

sequestration rate under NT. According to West & Post (2002), this peak could be reached within 5-10 years after the introduction of NT.

5.3.3. Humic substances

According to Figure 5.3, the organic matter under NT was composed of significantly higher amounts of humic acids (HA) and humin (HU), and lower amounts of fulvic acids (FA) compared to CT in Vertisol. This is consistent with results obtained by Szajdak et al. (2003). The relative decrease in FA under NT compared to CT was probably due to the humification process which was favored by residue management under NT and resulted in a significant increase of the most stable fraction (HA and HU) (González et al., 2003).

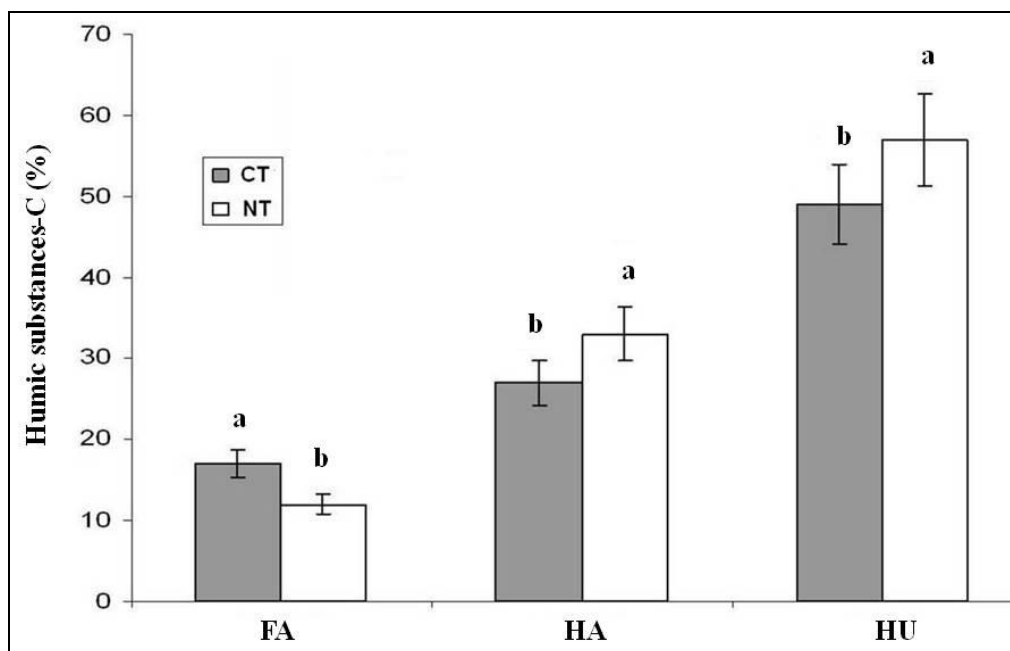


Fig.5.3. Humic substances in Vertisol under NT and CT; (FA: Fulvic Acid; HA: Humic Acid; HU: Humin); for each of the substances.

Treatments with the same letter are not significantly different (t-student test with $p < 0.05$)

Blanco-Canqui & Lal (2004) reported that the increases of the humic acids are particularly involved in aggregate stabilization more than fulvic acid. According to Piccolo et al. (1997), additional HA serve to bond particles together and can be adsorbed onto clay particles by

polyvalent cations, making them especially effective in overcoming clay dispersion, improving soil water content and reducing soil erosion (Balesdent, 1996).

In our case, positive effects of NT on aggregate stability and soil water content in the studied Vertisol have been reported in a previous study (Moussadek et al., 2011).

5.4. Conclusions

The introduction of no-tillage (NT) in wheat-based systems of Central Morocco could be an alternative for improving soil quality. After five years of NT, a significant increase in soil organic carbon (SOC) was found compared to CT for two major soils (Vertisol and Cambisol). SOC stock increased from 2% to 10%, depending on the soil type. Indeed, Vertisols or similar clay soils in general are able to store more SOC under NT along the profile than coarse textured soil. This accumulation of organic carbon resulted in increased levels of humic acids and humin in Vertisol under NT compared to CT. The obtained result show that NT can contribute to the improvement of soil quality in semiarid Mediterranean conditions.

5.5. References

- Alvaro-Fuentes, J., Lopez, M.V., Cantero-Martinez, C. & Arrue J.L. 2008. Tillage effects on soil organic carbon fractions in Mediterranean dryland agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 541–547.
- Balesdent, J. 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols de France. *Etude et Gestion des sols*. 3(4), 245-260.
- Basso, F., Pissante, M. & Basso, B., 2002. Soil erosion and land degradation. In: Geeson et al. (eds), *Mediterranean desertification. A mosaic of processes and responses*. NY. John Wiley; .347-359.
- Ben Moussa-Machraoui, S., Errouissi, F. & Ben-Hammouda, M. 2010. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in north-western Tunisia. *Soil Till. Res.* 106, 247-253.
- Bernoux, M., Carvalho, M.D.S., Volkoff, B. & Cerri, C.C. 2002. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 888-896.
- Bescansa, P., Imaz, M.J., Virto, M.J., Enrique, A. & Hoogmoed, W.B. 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil Till. Res.* 87, 19–27.
- Blanco-Canqui, H. & Lal, R. 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. Critical review. *Plant Sci.* 23(6), 481-504.
- Cassel, D. K., Raczkowaki, C. W. & Denton, H. P. 1995. Tillage effect on corn production and soil physical conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1436-1443.
- Dabin, B. 1976. Méthode d'extraction et de fractionnement des matières humiques du sol. Application à quelques études pédologiques et agronomiques dans les sols tropicaux. *Cah. O.R.S.T.O.M. Pédol.* XIV. 4, 287-297.

- Derpsch, R. & Friedrich, T. 2009. Global Overview of Conservation Agriculture Adoption. In Proceedings 4th World Congress on Conservation Agriculture, February, 4–7, 2009, New Delhi, India. p. 429-438.
- Dress, L. R., Karathansis, A. D., Wilding, L. P. & Belvins, R. L. 1994. Micromorphological characteristics of long term no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 508-517.
- Drijber, R.A., Doran, J.W., Parkhurst, A.M. & Lyon, D.J. 2000. Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Bio. and Bioch.* 32, 1419-1430.
- Fernandez-Ugalde, O., Virto, I., Bescansa, P., Imaz, M.J., Enrique, A. & Karlen, D.L. 2009. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils. *Soil & Tillage Res.* 106, 29-35.
- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M. & Zuberer, D.A. 1995. Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil CO₂ evolution. water content. temperature and bulk density. *Appl. Soil Ecol.* 2, 95–109.
- Franzluebbers, A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil. Till. Res.* 66, 95–106.
- Franzluebbers, A.J. 2004. Tillage and Residue management effect on soil organic matter. In Magdoff, F. & Weil, R.R. (eds.). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press. Boca Raton, FL. p.227-268.
- González, M.G., Conti, M.E., Palma, R.M. & Arrigo, N.M. 2003. Dynamics of humic fractions and microbial activity under no-tillage or reduced tillage, as compared with native pasture (Pampa Argentina). *Biol. Fertil. Soils.* 39, 135-138.

- Grossman, R. B. & Reinsch, T. G. 2002. Bulk density and linear extensibility. p. 201–228. *In* Dane, J. H. & Topp, G.C. (eds). Methods of soil analysis, Part 4, Physical methods. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Hassink, J. 1995. Decomposition rate constants of size and density fractions of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am.J.* 59,1631-1635.
- Hernanz, J.L., Sanchez-Giron, V. & Navarrete, L. 2009. Soil carbon sequestration and stratification in a cereal/leguminous crop rotation with three tillage systems in semiarid conditions. *Agr. Ecosyst. Environ.* 133,114–122
- Jordan, A., Zavala, L. M. & Gil, J. 2010. Effect of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena.* 81, 77-65.
- Karlen, D. L., Wollenhaupt, N. C., Erbach, D. C., Berry, E. C., Swan, J. B., Eash, N. S. & Jordahl, J. L. 1994. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil Till. Res.* 31, 149-167.
- Lal, R. 1988. Conservation tillage for sustainable agriculture. *Adv. Agro.* 42, 185-197.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma.* 123, 1-22.
- Lal, R. 2006. Enhancing crop yields in developing countries through Restoration of soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degra. Dev.* 17, 197–209.
- Lampurlanés, J. & Cantero-Martinez, C. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agron. J.* 95, 526–536.
- López-Bellido, L., Lopez-Garrido, F.J., Fuentes, M., Castillo, J.E. & Fernández, E.J. 1997. Influence of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on soil organic matter and nitrogen under rainfed Mediterranean conditions. *Soil. Till. Res.* 43, 277–293
- MacCallister, D.L. & Chien, W.L. 2000. Organic carbon quantity and forms as influenced by tillage and cropping sequence. *Com. Soil Sci. and Plant Analys.* 31, 465-479.

- Madrid, R., Valverde, M., Guillén, L., Sanchez, A. & Lax, A. 2004. Evolution of organic matter added to soils under cultivation conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167, 39-44.
- Moreno, F., Murillo, J.M., Pelegrin, F. & Giron, I.F. 2006. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO_3 . *Soil Till. Res.* 85, 86–93
- Moussadek, R., Mrabet, R., Zante, P., Lamachere, J-M., Pepin, Y., Le Bissonnais, Y., Ye, L., Verdoodt, A. & Van Ranst, E. 2011. Influence du semis direct et des résidus de culture sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen. *Can. J. Soil Sci.* 91. (4), 627-635.
- 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. 207p.
- Mrabet, R., Saber, N., El-Brahli, A., Lahlou, S. & Bessam, F. 2001. 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. 2003. Mediterranean Conservation Agriculture. A paradigm for cropping systems. 16th Triennial Conference of International Soil Tillage Research Organization (ISTRO-2003). 13-19 July. 2003. Brisbane. Australia. Pp. 774-779.
- Mrabet, R. 2006. Soil quality and carbon sequestration. Impacts of no-tillage systems. *Options Méditerranéennes*. 65, 45-60.
- Mrabet, R. 2008. No-Tillage systems for sustainable dry land agriculture in Morocco. INRA Publication. Fanigraph édition. 153p.
- Mrabet, R. 2010. Climate change and carbon sequestration in the Mediterranean basin. Contributions of no-tillage systems. *Options Méditerranéennes*. 96, 165-184.

- Murillo, J.M., Moreno, F., Pelegrin, F. & Fernández, J.E. 1998. Responses of sunflower to conventional and conservation tillage under rainfed conditions in southern Spain. *Soil. Till. Res.* 49, 233–241.
- Needlman, B. A., Wander, M.M., Ballero, G.A., Boast, C.W., Sims, G.K. & Bullock, D.G. 1999. Interaction of tillage and soil texture. biologically active soil organic matter in illinois. *Soil Sci.Soc. Am. J.* 63,1326-1334.
- Oorts, K., Bossuyt, H., Labreuche, J., Merckx, R. & Nicolardot, B., 2007. Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *Euro. J. Soil Sci.* 58, 248-259.
- Ouassou, A., Amziane, T. & Lajouad, L. 2006. State of natural resources degradation in Morocco and plan of action for desertification and drought control. *In* Desertification in the Mediterranean Region. A Security Issue, (eds). Kepner, W. G. Rubio, J. L. Mouat, D. A. & Pedrazzini, F. Dordrecht, Netherlands. Springer. 253p.
- Piccolo, A. 1988. Characteristics of soil humic matter addition by caulescent Andean rosettes on surficial soil. *Geoderma.* 54, 151-171.
- Piccolo, A., Pietramellara, G. & Mbagwu, J.S.C., 1997. Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability. *Geoderma.* 75, 267–277.
- Sanchez, P. A. & Swaminathan, M. S. 2005. Cutting world hunger in half. *Science.* 307, 357–359.
- Soil Survey Staff. 1993. Soil survey manual. Soil conservation service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- Soudi, B., Chiang, C.N., Berdai, H. & F. Naaman , 2003. Statut du cycle de l’azote et de la matière organique en zones semi-arides irriguées et d’agriculture pluviale. *Revue H.T.E.* 127, 24-31.
- Szajdak, L., Jezierski, A. & Cabrera, M.L. 2003. Impact of conventional and no-tillage

management on soil amino acids, stable and transient radicals and properties of humic and fulvic acids. *Org. Geochemistry*. 345. 693-700.

Swaminathan, M. S. 2000. Science in response to basic human needs. *Science*, 287, 425.

Thomas, G.A., Dalal, R.C. & Standley, J. 2007. No-till effects on organic matter. pH. cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics. *Soil. Till. Res.* 94.pp. 295–304.

Virto, I., Imaz, M.J., Enrique, A., Hoogmoed, W. & Bescansa, P. 2007. Burning crop residues under no-till in semi-arid land, Northern Spain-effects on soil organic matter, aggregation, and earthworm populations. *Aust. J. Soil. Res.* 45, 414–421.

Walkley, A. & Black, I. A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29–38.

WRB, 2006. World reference base for soil resources, 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.

West, T.O. & Post, G. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1930–1946.

Chapitre 6. Impact des pratiques du labour sur le flux du dioxyde du carbone durant différentes saisons dans un Vertisol Méditerranéen

Ce chapitre est adapté à partir de l'article publié suivant:

Moussadek, R., Mrabet, R., Verdoodt, A., Dahan, R., Douaik, A., Van Ranst, E. & Corbeels, M. 2011. **Effect of tillage practices on the soil carbon dioxide flux during fall and spring seasons in a Mediterranean Vertisol.** Journal of Soil Science and Environmental Management, 2 (11): 362-369.

Effect of tillage practices on the soil carbon dioxide flux during different seasons in a Mediterranean Vertisol

Abstract

In this study, we assessed the effect of conventional tillage (CT), reduced (RT) and no tillage (NT) practices on the soil CO₂ flux of a Mediterranean Vertisol in semi-arid Morocco. The measurements focused on the short term (0-96 hours) soil CO₂ fluxes measured directly after tillage during the fall and spring period. Soil temperature, moisture and soil strength were measured congruently to study their effect on the soil CO₂ flux magnitude. Immediately after fall tillage, the CT showed the highest CO₂ flux (4.9 g m⁻² h⁻¹); RT exhibited an intermediate value (2.1 g m⁻² h⁻¹) whereas the lowest flux (0.7 g m⁻² h⁻¹) was reported under NT. After spring tillage, similar but smaller impacts of the tillage practices on soil CO₂ flux were reported with fluxes ranging from 1.8 g CO₂ m⁻² h⁻¹ (CT) to less than 0.1 g CO₂ m⁻² h⁻¹ (NT). Soil strength was significantly correlated with soil CO₂ emission, whereas surface soil temperature and moisture showed low correlation with to the soil CO₂ flux. The intensity of rainfall events before fall and spring tillage practices could explain the seasonal CO₂ flux trends. The findings promote conservation tillage and more specifically no tillage practices to reduce CO₂ losses within these Mediterranean agro-ecosystems.

Key Words: Tillage, CO₂ flux, seasonal variability, Vertisol, semi-arid Morocco

6.1. Introduction

The important role of CO₂ emissions from soils in the carbon cycle has (only) been clearly recognized for nearly a decade (Schlesinger & Andrews, 2000). Due to the large order of magnitude, small changes in soil CO₂ flux across large areas can produce a great effect on CO₂ atmospheric concentrations (Lal, 2004).

Soil plowing is a principal cause of CO₂ emission from croplands leading to a depletion of soil organic matter content (Paustian et al., 1997; Six et al., 2002; Lal, 2004). Increase of soil CO₂ emission after tillage was reported by several authors from North America and Europe (Reicosky & Lindstrom, 1993; Ellert & Janzen, 1999). Additionally, Reicosky et al. (1997) explained the increase in CO₂ flux immediately after tillage by a physical release of CO₂ entrapped in soil pores from previous microbial activity rather than the changes in microbial activity at the time of tillage. The magnitude of soil CO₂ flux, at tillage period, depends on the degree and time of soil disturbance as well as on the soil conditions, basically soil moisture and temperature (Prior et al., 2004; Alvaro-Fuentes et al., 2007). Several studies have observed seasonal CO₂ flux patterns associated with fall or spring tillage and some authors have reported that soil microclimate conditions during tillage events played an important role in CO₂ emission. Reicosky & Lindstrom (1993) and La Scala et al. (2001) reported that the increased CO₂ losses during fall tillage were due to a higher degree of soil disturbance and residue incorporation in soil. Similar findings have been reported during spring tillage practices (Reicosky et al., 1997; Ellert & Janzen, 1999; Prior et al., 2004). Other authors did not detect an immediate sharp increase of soil CO₂ following spring tillage and explained this by the impact of soil climate parameters (soil moisture and temperature) on soil respiration during tillage (Hendrix et al., 1988).

In the Mediterranean region, the tilled soils are generally characterized by relatively low soil moisture contents and high temperatures. This research aimed to assess the soil carbon flux

under these climatic conditions of fall and spring tillage. Hence, the specific objectives of this study were (1) to quantify the seasonal, short (0 to 24 hours) and mid-term (24-96 hours) CO₂ flux after fall and spring tillage in response to contrasting tillage systems and (2) to identify the soil properties that may explain variations in the soil respiration.

6.2. Materials and methods

6.2.1. Physiographic setting

The experiment was conducted at the Merchouch research station of the National Institute of Agricultural Research (INRA), located 60 km south of Rabat (Latitude 33°37' N and Longitude 6°43' W). The site is characterised by a flat topography and is dominated by poorly drained Vertisols (Chromic Calcixererts) that are slightly alkaline and have low organic matter contents but adequate P and K levels in the surface horizons (Table 6.1).

Tab.6.1. Selected soil properties at the start of the experiment

Depth (cm)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	pH (1.1 H ₂ O)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ₂ O (mg/kg)
0-20	50	37	13	7,8	19,6	323
20-40	51	38,	11	8,3	4,2	184
40-90	53	35	12	8,6	0,5	145

The mean long-term annual precipitation and temperature are 410 mm and 23°C, respectively. Monthly average precipitation and temperature during the 2009-2010 cropping season as well as the long term (40-year) average values are shown in Figure 6.1. Daily temperature and precipitation were measured in automated weather stations nearby the experiment.

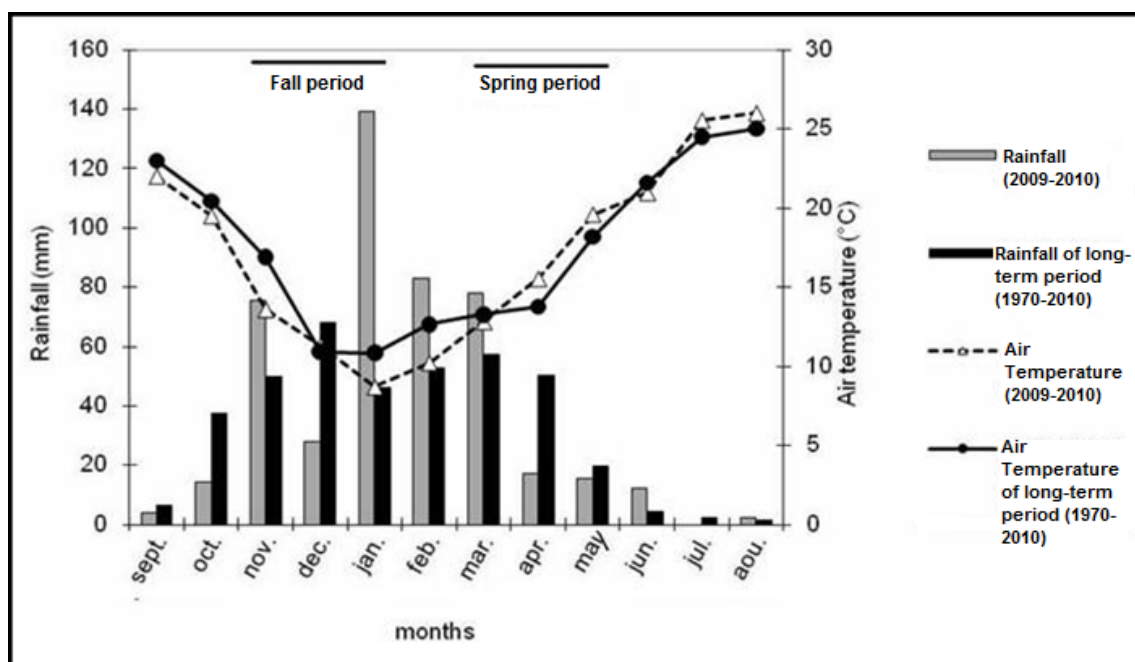


Fig.6.1. Long-term average and 2009-2010 cropping season values of rainfall and temperature at the Merchouch research station.

6.2.2. Experiment layout and treatments

The study was conducted on a 1.5 ha plot that has been under fallow and disked in spring for weed control during 2 years before starting the experimentation in 2009. The land was subdivided into 2 equal subplots of 0.75 ha. The first subplot was used for fall tillage practices and the second for spring tillage operations. On 14 November 2009, the first subplot was divided into 12 small plots (50 m x 10 m) arranged in a randomized complete block design with 4 treatments, each replicated 3 times. The treatments were (1) disk plough; (2) chisel as conventional tillage; (3) tine harrow as reduced tillage; and (4) no tillage. In spring (12 April 2010), the same tillage treatments were applied in the second subplot using the same experimental design.

The disk plough practice consisted of a tandem disk harrow (John Deer type -215) operated at about 25 cm depth and with a width of 4 m. The disk blades were spaced at 22.8 cm and had a radius of 25 cm. The disk angle was adjusted to about 14.5°. The chisel treatment operated at 20 cm and consisted of 11 rigid shanks of 18 cm width and spaced 28 cm apart. The rigid tine harrow consists of four bars. The harrow was tilling at less than 15 cm soil depth with a width

of 1.8 m. In the last treatment, the no-tillage plots were left undisturbed. The soil organic carbon and the amount of residues were the same for the different tillage treatments.

6.2.3. Soil CO₂ measurement

Soil CO₂ emission was measured using a chamber system (ACE-Automated Soil CO₂ Exchange System). Measurements are typically made by measuring the rise in CO₂ concentrations inside the chamber. The chamber automatically opens between analysis cycles allowing ambient conditions to reach the soil. Soil CO₂ flux was calculated from the difference in CO₂ concentrations between air entering and leaving the chamber. The chamber had a cylindrical diameter of 23 cm, covering a soil surface of 415 cm². To prevent CO₂ leakage to atmosphere, the chamber was inserted 5 cm into the soil. The first flux reading was taken 3 min after the chamber was installed in order to avoid possible unrealistic values caused by the disturbance produced after placing the chamber into the soil (Pumpanen et al., 2004).

In each of the 12 small plots, soil CO₂ flux was measured randomly at 24 h before and immediately after tillage operations with 24 hours interval (0h, 24 h, 48h and 96 h) in fall and spring. To determine the cumulative CO₂ flux, a trapezoidal function was used (Alvaro-Fuentes et al., 2007).

6.2.4. Soil water content and soil temperature

Soil temperature and water content were measured at the same locations and times, when CO₂ emission was measured. A soil sample was collected at the surface horizon (0-5 cm) to determine the gravimetric soil water content by oven drying at 105°C. Soil temperature was measured with a hand-held probe (ECT, Decagon model) which was inserted 5 cm into the soil near the CO₂ chamber.

6.2.5. Soil strength

Immediately after tillage operations, soil strength was measured throughout the topsoil 30 cm at 10 randomly located points in each of the treatments. Measurements were done using a Rimik CP- 20 cone penetrometer (base area 2 cm², angle 60°). The initial soil water content was determined by the gravimetric method in order to take into account the effect of soil moisture on soil strength.

6.2.6. Statistical analysis

The collected data were subjected to a statistical analysis using SPSS. Since we are interested in comparing the tillage effect on CO₂ flux for each season and each time period, analysis of variance (ANOVA) was used to study the difference between tillage treatments and least significant difference method (LSD) was applied for comparison of treatment means. Correlations between the soil CO₂ flux and soil temperature, soil moisture and soil strength were determined and tested for their significance using the Pearson correlation coefficient.

6.3. Results and discussion

First of all, the ANOVA was done reconsidering the effect of all factors on CO₂ (season, time and tillage). The results of this analysis showed that there is a very highly significant difference ($p < 0,001$) between the two seasons (fall, spring). Therefore, the subsequent analysis was done separately for each season.

6.3.1. Soil CO₂ emission in fall tillage

Figure 6.2 showed that both conventional (chisel and disk) and reduced (harrow) tillage practices in the fall caused an immediate sharp increase in soil CO₂ flux within 24 hours time. In contrast, the no-tillage practice did not result in a significant change of the soil CO₂ flux. The chisel tillage showed the highest CO₂ fluxes (4.9 g m⁻² h⁻¹) followed by the disk tillage (3.9 g m⁻² h⁻¹). The reduced tillage (harrow) exhibited intermediate values (2.1 g m⁻² h⁻¹).

followed by the no-tillage treatment, which had the lowest CO₂ flux (0.7 g m⁻² h⁻¹). The 4 treatments were highly significantly different from each other ($p < 0.001$).

These findings reflect the degree of soil disturbance that the chisel and disk treatments implemented. In fact, the disk and chisel treatment resulted in a more soil disturbance (Raper 2002).

Twenty four hours after tillage, the CO₂ flux had already decreased to remain more or less constant up to the end of the measurements (Fig. 6.2).

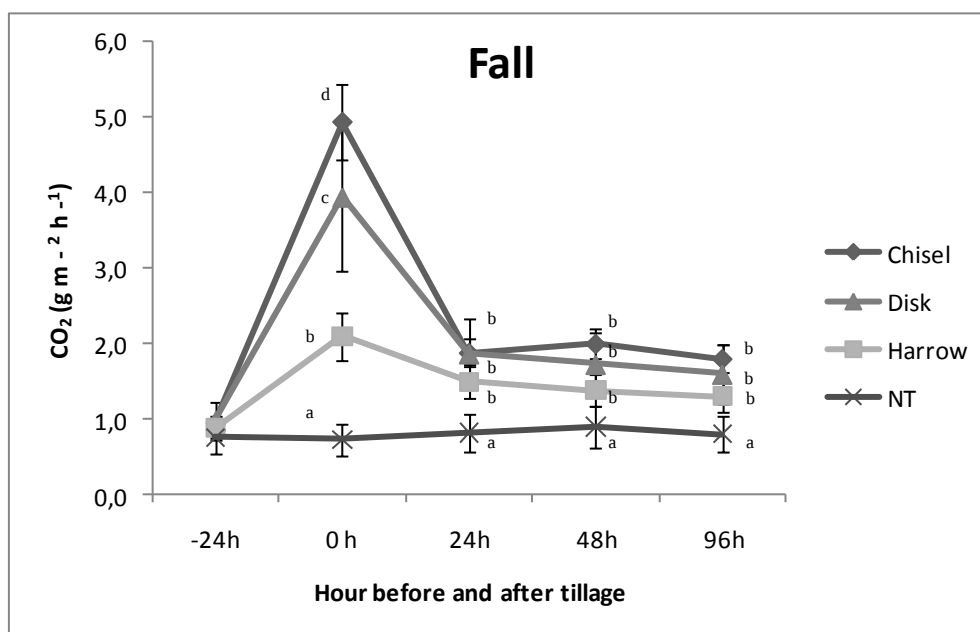


Fig.6.2. Soil CO₂ flux associated with fall tillage treatments

For the same hour, treatments with the same letter are not significantly different, (LSD test, $p < 0.05$).

The same trend was reported by Alvaro-Fuentes et al. (2007) under semi-arid conditions in Spain, where the CO₂ flux immediately obtained after fall tillage ranged between 3 to 13 g m⁻² h⁻¹, while the no-tillage treatment had a lower CO₂ value (less than 1 g m⁻² h⁻¹). Similarly, Reicosky et al. (1997) reported that the amount of CO₂ emitted immediately after tillage was proportional to the degree of soil disturbance produced while no-tillage was not inducing any significant CO₂ flux.

6.3.2. Soil CO₂ emission in spring tillage

The soil CO₂ emissions were lower in the spring tillage treatments compared to those observed in the fall tillage operations (Fig. 6.3). CO₂ flux values ranged from 0.8 g m⁻² h⁻¹ (harrow) to 1.8 g m⁻² h⁻¹ (disk). The chisel treatment had an intermediate value 1.4 g m⁻² h⁻¹. No significant difference was observed between the disk and chisel treatments, but the reduced tillage and no-tillage treatments exhibited significantly lower CO₂ fluxes. Alvaro-Fuentes et al. (2007) found a similar trend in CO₂ fluxes that ranged between 0.1 g m⁻² h⁻¹ and 1.2 g m⁻² h⁻¹ immediately after no tillage and conventional spring tillage, respectively.

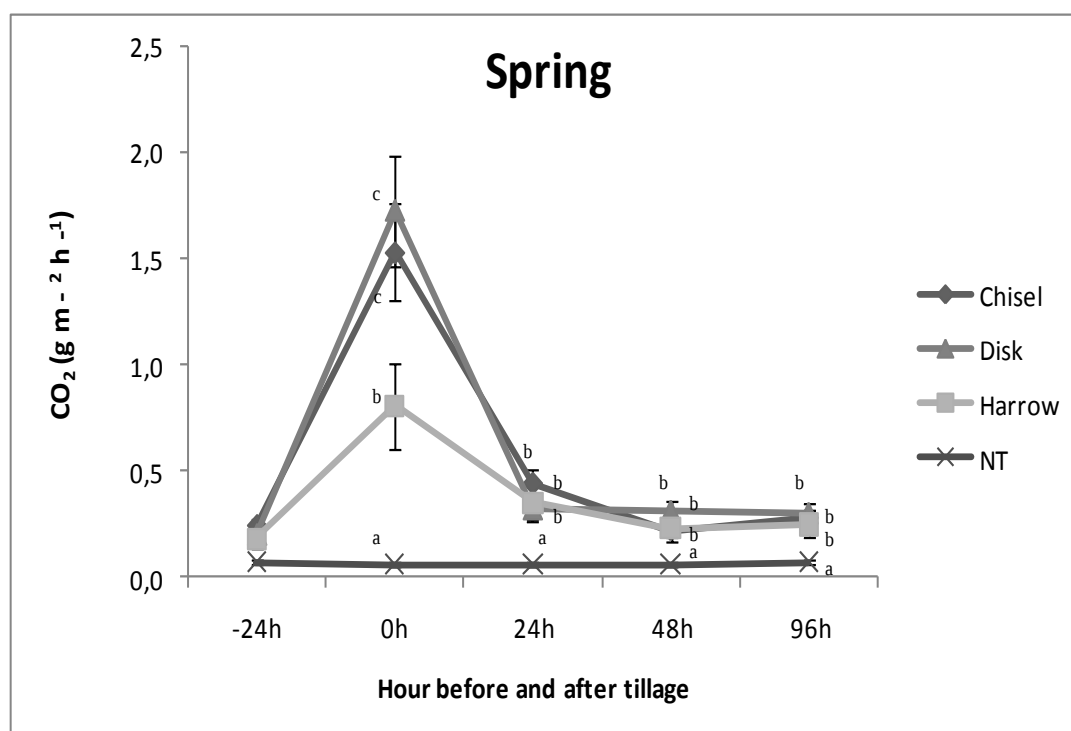


Fig.6.3. Soil CO₂ flux associated with spring tillage treatments

For the same hour, treatments with the same letter are not significantly different, (LSD test, $p < 0.05$).

6.3.3. Effect of soil temperature and moisture content on the soil CO₂ flux

Figure 6.4 shows the soil water content (SWC) and soil temperature (T) measured at 24h time steps before and after tillage in fall and spring. For all treatments, soil moisture decreased slightly after tillage events in fall and spring, but no significant difference was observed between tillage treatments in both seasons. Mrabet (2002) reported that the soil moisture decrease after tillage is due to high soil water evaporation in this semi-arid area.

Also soil surface (0-5 cm) temperature (T) was not significantly affected by tillage practices and no significant differences were observed between treatments at fall and spring. Several authors reported similar insignificant effects of tillage operations on soil temperature and moisture in similar semi-arid conditions (Alvaro-Fuentes et al., 2007).

Soil CO₂ flux observed in fall and spring period were not correlated to soil water content (SWC) nor to temperature (T) measured at 0-5 cm topsoil layer (Table 6.2).

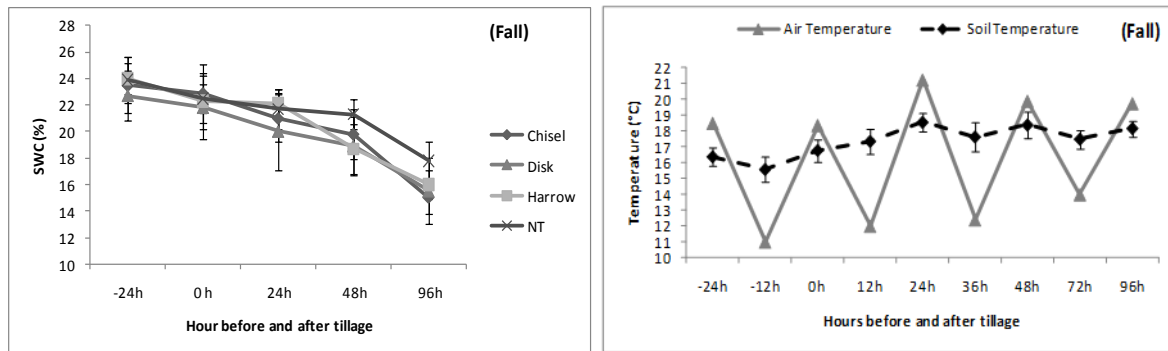
Tab.6.2. Pearson's correlation coefficients between soil CO₂ flux and soil water content and soil temperature during fall and spring tillage

	CO ₂ flux (Fall)		CO ₂ flux (Spring)	
	r	P	r	p
SWC	0.22	0.54	0.42	0.51
T	0.05	0.91	0.36	0.19

SWC - soil water content at 0-5 cm; T - soil temperature at 0-5 cm.

The absence of significant correlation between T and SWC and CO₂ flux may be related to the fact that those parameters were assessed at surface horizon (0-5 cm) only, whereas soil tillage operations were affecting deeper soil horizons.

a)



b)

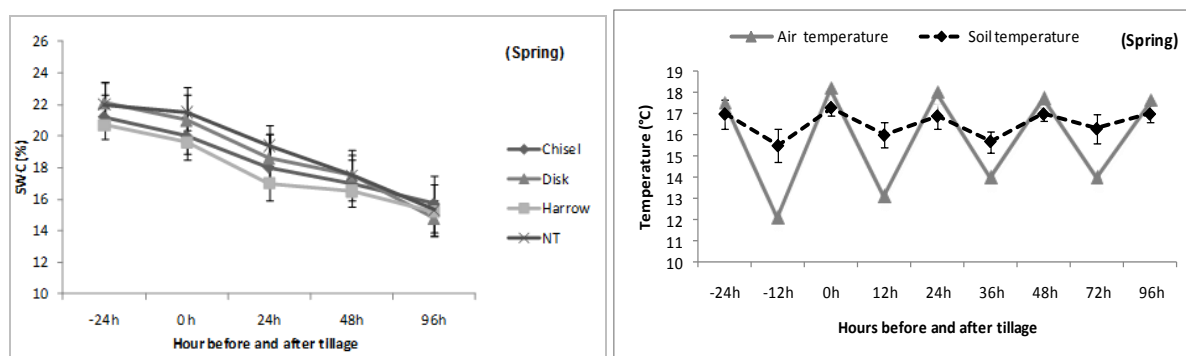


Fig.6.4. Topsoil (0-5 cm) water content (SWC) under different tillage treatments and mean soil (0-5 cm) and air temperature before and after tillage during the fall (a) and spring (b). (*) means the presence of significant difference between treatments.

6.3.4. Soil strength

The influence of tillage practices on soil strength measured one hour after tillage is shown in Figure 6.5. No significant difference were observed on initiale soil moisture content measured in same time as soil strength in different tillage treatments The cone index (C.I.) varied with treatments and depths. The C.I. at 0 to 10 cm depth was significantly higher under no-tillage compared to the other treatments. This is explained by the immediate effect of soil disturbance under those tillage treatments compared to the no-till plots. However, at a depth more than 10 cm, no statistically significant differences in C.I. were found between reduced and no tillage. The chisel and disk treatments exhibited the same trends in both fall and spring.

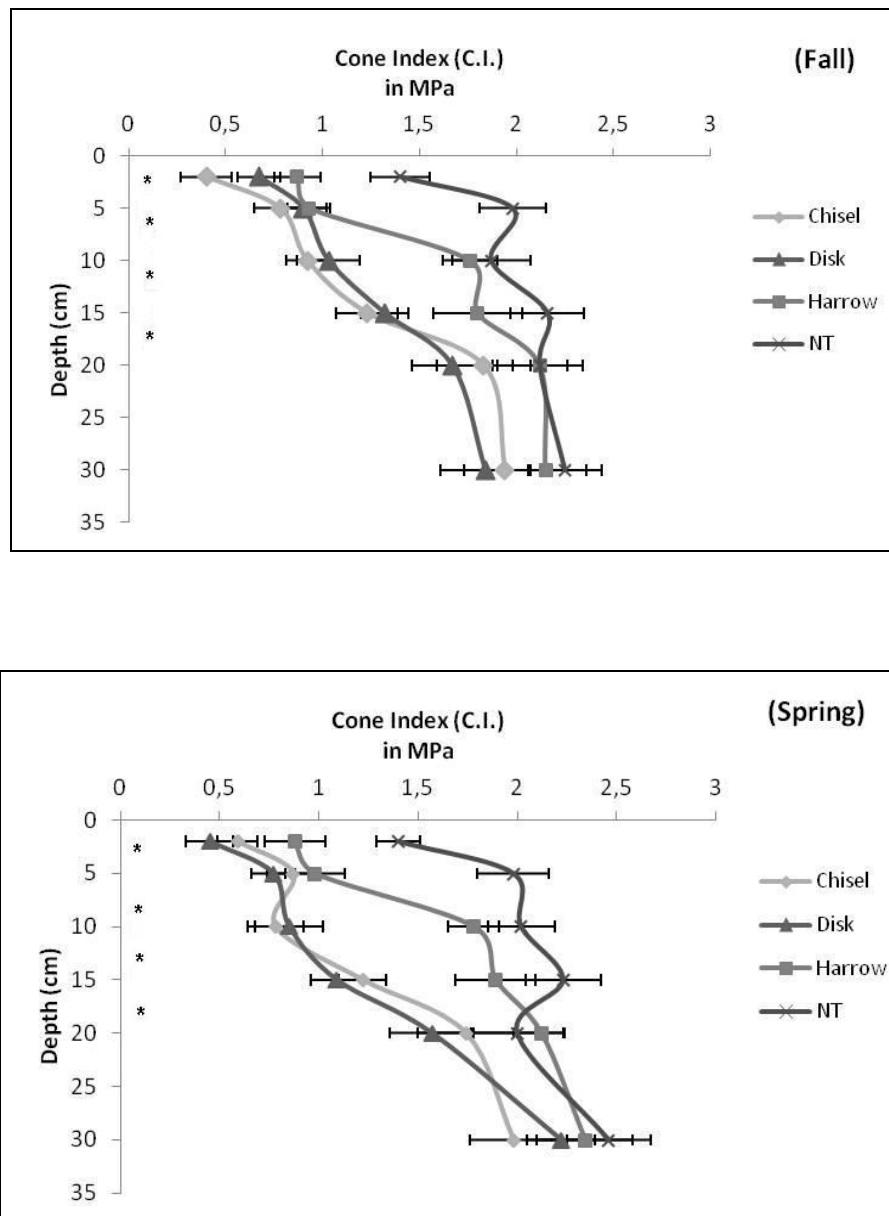


Fig.6.5. Soil strength (C.I) measured 1 hour after tillage under different treatments, during fall and spring period. At each depth (*) means the presence of significant differences between treatments.

Soil strength of the topsoil 15 cm was significantly negatively correlated with the soil CO₂ flux during fall and spring periods (Table 6.3). At 20 to 30 cm depth, the correlation was not statistically significant, but clearly showed a negative trend. As C.I. is used as indicator for soil disturbance (Carter et al., 2007), our results showed that soil CO₂ flux is correlated to the degree of soil disturbance near the soil surface.

Tab.6.3. Pearson's correlation coefficients between soil CO₂ flux and soil cone index per depth during fall and spring tillage

	CO ₂ flux (Fall)		CO ₂ flux (Spring)	
	r	p	R	p
C.I. (0-10 cm)	-0.64	0.032	-0.56	0.045
C.I. (10-20 cm)	- 0.45	0.054	-0.38	0.063
C.I. (20-30 cm)	-0.23	0.141	-0.31	0.119

C.I. – soil cone index.

6.3.5. Cumulative CO₂ emission during fall and spring tillage

Figure 6.5 indicates the cumulative soil CO₂ emissions using a simple trapezoidal integration function from 0 to 96 hours after tillage in all treatments during the fall and spring periods.

In fall period, no significant difference in cumulative CO₂ loss was observed between the chisel and disk tillage (about 155 g m⁻²). The reduced tillage (harrow) exhibited intermediate values (104 g m⁻²), followed by the no-tillage treatment, which had the lowest CO₂ flux (56 g m⁻²). The same trend was observed in spring period. In fact, no significant difference in cumulative CO₂ loss was observed between the chisel and disk tillage (43 g m⁻²). The reduced tillage (harrow) exhibited intermediate values (24 g m⁻²), followed by the no-tillage treatment, which had the lowest CO₂ flux (6 g m⁻²).

From Figure.6.6, we conclude that the cumulative CO₂ emission is higher during fall period than in the spring period.

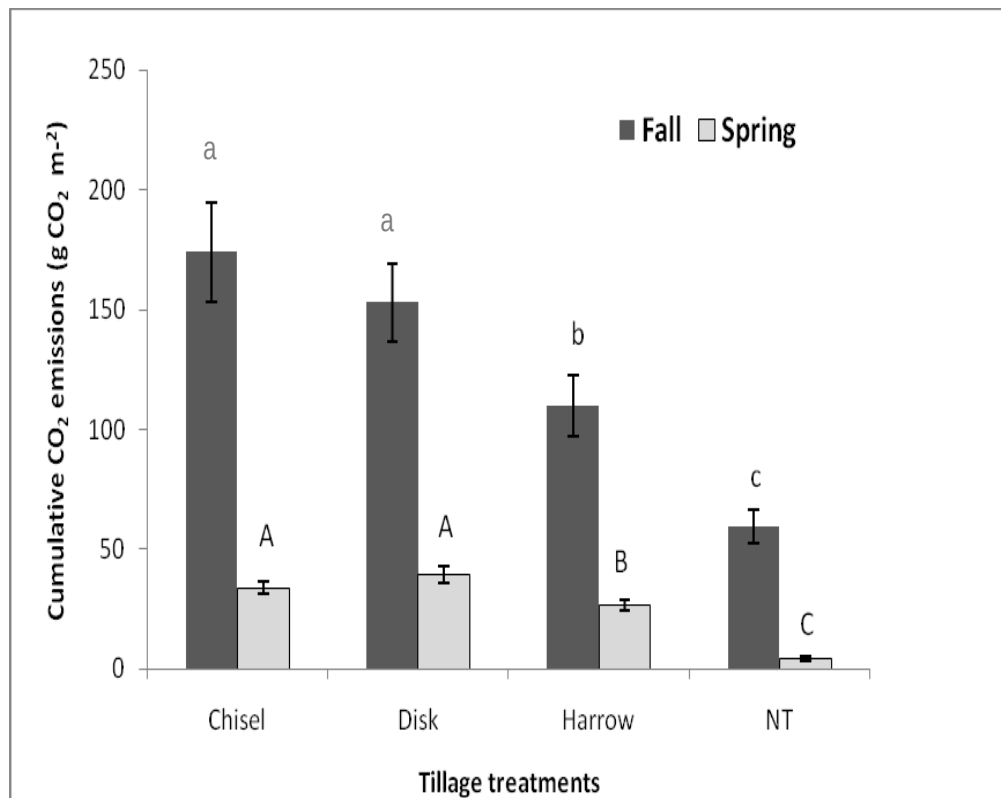


Fig.6.6. Cumulative CO₂ flux during the first 96h following fall and spring tillage operations. (Treatments with the same letter are not significantly different from each other, LSD ($p < 0,05$))

This difference in seasonal CO₂ flux losses during spring and fall can be explained by the greater build-up of CO₂ in the soil at the time of fall tillage due to microbial breakdown of easy decomposable organic substrates (Prior et al., 2004). Also, the soil CO₂ reservoir at the time of spring tillage is expected to be lower due to winter losses attributable to both microbial respiration and physical displacement of soil CO₂ as a result of regular rainfall (Harper et al., 2005).

In fact, in our case study, before fall period (September and October 2009) only 40 mm rainfall occurred in contrast with 300 mm rainfall that occurred before spring period (from January to March 2010) (Figure 6.1).

6.4. Conclusions

This research demonstrates that soil disturbance increases CO₂ flux immediately after tillage of a semi-arid Vertisol. Yet, the magnitude of the CO₂ flux changes throughout the year, with fall tillage exhibiting much higher CO₂ emissions than spring tillage. The soil CO₂ flux under no tillage was lower than under the other treatments during fall and spring. The tillage induced flush CO₂ was attributed most probably to the soil disturbance, thereby reducing soil strength and promoting CO₂ diffusion. Our findings promote the use of no-tillage practices to reduce CO₂ losses in this semi-arid region, contributing to the mitigation of green house gases and consequently reducing the negative impact of climate change. The obtained results contribute to a better understanding of seasonal CO₂ fluxes in general and to define the optimum tillage operations that can decrease soil CO₂ emission of Vertisols in the semi-arid Mediterranean region.

6.5. References

- Alvaro-Fuentes, J., Cantero-Martinez, C. & Lopez, M.V. 2007. Soil carbon dioxide fluxes following tillage in semiarid Mediterranean agro ecosystems. *Soil Till. Res.* 96, 331-341.
- Carter, E.A., Aust, W.M. & Burger, J.A. 2007. Soil strength response of select soil disturbance classes on a wet pine flat in South Carolina. *Forest Ecol. Manag.* 247, 131-139.
- Ellert, B.H. & Janzen, H.H. 1999. Short-term influence of tillage on CO₂ fluxes from a semi-arid soil on the Canadian Prairies. *Soil Till. Res.* 50, 21-32.
- Harper, C.W., Blair, J.M., Fay, P.A., Knapp, A.K. & Carlisle, J.D. 2005. Soil moisture decreased slightly after tillage events. *Glob. Change Biol.* 11, 322-334.
- Hendrix, P.F., Han, C.R. & Groffman, P.M. 1988. Soil respiration in conventional and no-tillage agro ecosystems under different winter cover crop rotations. *Soil Till. Res.* 12, 135-148.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma.* 123, 1-22.
- La Scala, N., Lopes, A., Marques, J. Jr. & Pereira, G.T. 2001. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red Latosol in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 62, 163-166.
- Mrabet, R. 2002. Wheat yield and water use efficiency under contrasting residue and tillage management systems in a semiarid area of Morocco. *Exp. Agric.* 38, 237-248.
- Paustian, O.A., Janzen, H.H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., Tiessen, H., Van Noordwijk, M. & Woomer, P.L. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions, *Soil Use Manage.* 13, 230-244.
- Prior, S.A., Raper, R.L. & Runion, G.B. 2004. Effect of implement on soil CO₂ flux. fall vs. spring tillage. *TRANS. ASAE.* 47, 367-373.
- Pumpanen, J., Kolari, P., Ivesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Ninisto, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J.C., Grünzweig, J.M., Reth, S.,

- Subke, J.A., Kutsch, K.W., Ostreng, G., Ziegler, W., Anthoni, P., Lindroth, A. & Hari, P. 2004. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agr. Forest Meteorol.* 123, 159–176.
- Raper, R.L. 2002. The influence of implement type, tillage depth, and tillage timing on residue burial. *TRANS. ASAE.* 45, 1281–1286.
- Reicosky, D.C. & Lindstrom, M.J. 1993. Fall tillage method. effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agron. J.* 85, 1237–1243.
- Reicosky, D.C., Dugas, W.A. & Torbert, H.A. 1997. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil Till. Res.* 41, 105–118.
- Schlesinger, W.H. & Andrews, J.A. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry.* 48, 7–20.
- Six, J., Conant, R.T. & Paul, E.A. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter. implications for C-saturation of soils. *Review. Plant Soil.* 241, 155–176.

Chapitre 7. Effet de la variabilité climatique et le travail du sol sur le rendement des cultures sous un Vertisol Méditerranéen

Ce chapitre est adapté à partir d'un article en préparation et qui sera soumis dans le Journal 'Canadian Journal of plant Science'.

7. Effet de la variabilité climatique et le travail du sol sur le rendement des cultures sur un Vertisol Méditerranéen

Résumé

Au Maroc, l'agriculture pluviale est pratiquée dans la majorité des terres agricoles. Cependant l'utilisation intensive de ces terres couplée à l'irrégularité des précipitations constituent des menaces sérieuses affectant la sécurité alimentaire du pays. L'agriculture de conservation constitue une alternative prometteuse pour produire plus et de manière durable. En effet, le semis direct a montré des résultats concluants dans les régions semi-arides du Maroc mais sa dissémination vers d'autres zones agro-écologiques plus humides (précipitation > 350 mm) reste encore faible. Pour contribuer à cet effort de recherche et d'adoption, un essai, à long terme, a été installé, depuis 2004, dans le plateau de Zaer (Maroc Central) afin d'étudier l'adaptation du semis direct (SD) à l'irrégularité pluviométrique qui marque cette région comparativement au semis conventionnel (SC). Les rendements (grain et biomasse) des cultures les plus pratiquées dans la région (blé et lentille) sous SD et SC ont été analysées et comparés par année et sur l'ensemble des 7 ans d'étude. Le test ANOVA a montré que les rendements sur les 7 ans sont significativement différents et que les rendements des cultures (blé, lentille) sous SD étaient supérieurs sinon égaux par rapport au SC malgré que la lentille fût plus vulnérable aux événements extrêmes du climat (sécheresse ou excès d'eau) sous les deux systèmes (SD et SC). Contrairement au SD, les rendements sous SC présentaient une corrélation significative avec la quantité de pluie reçue durant le cycle végétal des cultures. Ceci indique la dépendance du SC vis-à-vis des précipitations alors que le SD s'adapte mieux aux irrégularités du climat de la région d'étude.

Mots clés. Semis direct, Vertisol, rendement, blé, lentille, variabilité climatique, Maroc.

7.1. Introduction

Au Maroc, comme dans la plupart des pays Méditerranéens, la croissance démographique a accentué l'utilisation intensive de terres agricoles (Ouassou et al., 2006). Ceci a entraîné la détérioration rapide de la qualité des sols et la réduction de la productivité des cultures (Diaz-Ambrona et al., 2005). En plus, la variabilité climatique constitue un autre fléau majeur (Ryan et al., 2006). En effet, durant les dernières décennies, les événements extrêmes (sécheresse ou inondation) sont devenus plus fréquents (Driouech et al., 2010) et le déficit hydrique s'accroîtra encore selon les scénarios climatiques prévus pour cette région (Lionello et al., 2006).

Devant une telle situation, le semis direct constitue une alternative prometteuse pour adapter les systèmes de production aux conditions difficiles de la Méditerranée et ainsi assurer une production durable (Moreno et al., 2011). En effet, les recherches ont montré que ce système valorise mieux l'eau, conserve le sol contre l'érosion en améliorant son taux de matière organique et augmente la production agricole (Mrabet, 2011a).

Certes, l'objectif principal d'un tel système est d'assurer la durabilité de la production agricole mais la suppression du labour peut causer une réduction de rendement dans certaines régions, notamment en années humides (Kirkegaard et al. 1995) ou sur les sols argileux compactés (Alvaro-Fuentes et al. 2008; Moret and Arrúe 2007). Cependant, l'expérience globale a montré qu'avec une gestion correcte des mauvaises herbes et des résidus de récolte, le rendement des cultures sous semis direct ne peut que dépasser ou être égal à celui du semis conventionnel (Warkentin, 2001 ; Mrabet, 2008). Au Maroc, les premiers travaux sur le semis direct ont commencé en 1983 dans les zones semi-arides de la Chaouia et ils ont montré que les rendements grains des céréales sont supérieurs à ceux obtenus sous sols labourés (Bouzza, 1990).

D'autres expériences ont eu lieu dans la même zone et elles ont consolidé la supériorité de la production du blé sous semis direct (Mrabet, 2011b). Certes, ces résultats sont concluants pour la céréaliculture à l'échelle de cette région aride mais l'extension de ce système vers d'autres zones agro-écologiques nécessite plus de travaux de recherche à moyen et à long terme afin de tenir compte des conditions du milieu, particulièrement le type du sol et le climat (Lal, 1989; Aboudrare et al., 2006).

Pour contribuer à cet effort de recherche, un essai à long-terme a été installé dans le plateau de Zaer (Maroc Central) pour étudier l'effet du semis direct sur le rendement des cultures (céréales et légumineuses) sur un Vertisol sous climat Méditerranéen. En effet, les Vertisols occupent une place importante en terme de superficie au Maroc (Ahmad, 1996 ; Ryan et al., 2006) et ils n'atteignent leur potentiel de production que s'ils sont correctement aménagés (Deckers et al., 2001). Malgré que beaucoup de travaux ont eu lieu sur l'effet du semis direct sur la production des Vertisols à travers le monde (Ahmad, 1996), cependant ces résultats ont été contrastés sous climat méditerranéen (Yule & Willcocks, 1996; Mrabet, 2011a). De leur part, Syers et al. (2001) affirment qu'il n'existe pas un système unique pour la gestion de ces sols applicable partout et que cette gestion, intégrant la rotation et le travail du sol, doit être ajustée selon les conditions locales.

Cette recherche présente les résultats de l'effet du travail du sol (semis direct et semis conventionnel) sur la biomasse et le rendement des cultures (blé et lentilles) durant sept ans sur un Vertisol de la région du Zaer (Maroc Central). Les objectifs de cette étude sont (i) étudier l'effet de la variabilité climatique sur les rendements (grain et biomasse) des principales cultures de la région (blé et lentille), et (ii) analyser l'adaptation du semis direct aux Vertisols pour produire durablement.

7.2. Matériels et méthodes

7.2.1. Description des sites

L'expérimentation est localisée dans la station expérimentale de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Merchouch (60 km au sud de Rabat; 33°37' N; 6°43' O). Les moyennes annuelles des précipitations et des températures sont de l'ordre de 400 mm pour les précipitations et de 23°C pour les températures. Les moyennes mensuelles interannuelles des précipitations durant la saison agricole (Novembre-Juin) sur une période de 41 ans (1970-2011) sont présentées dans Tableau 7.2. La variation mensuelle de la température durant les 7 ans (2004-2011) est présentée dans Figure 7.1.

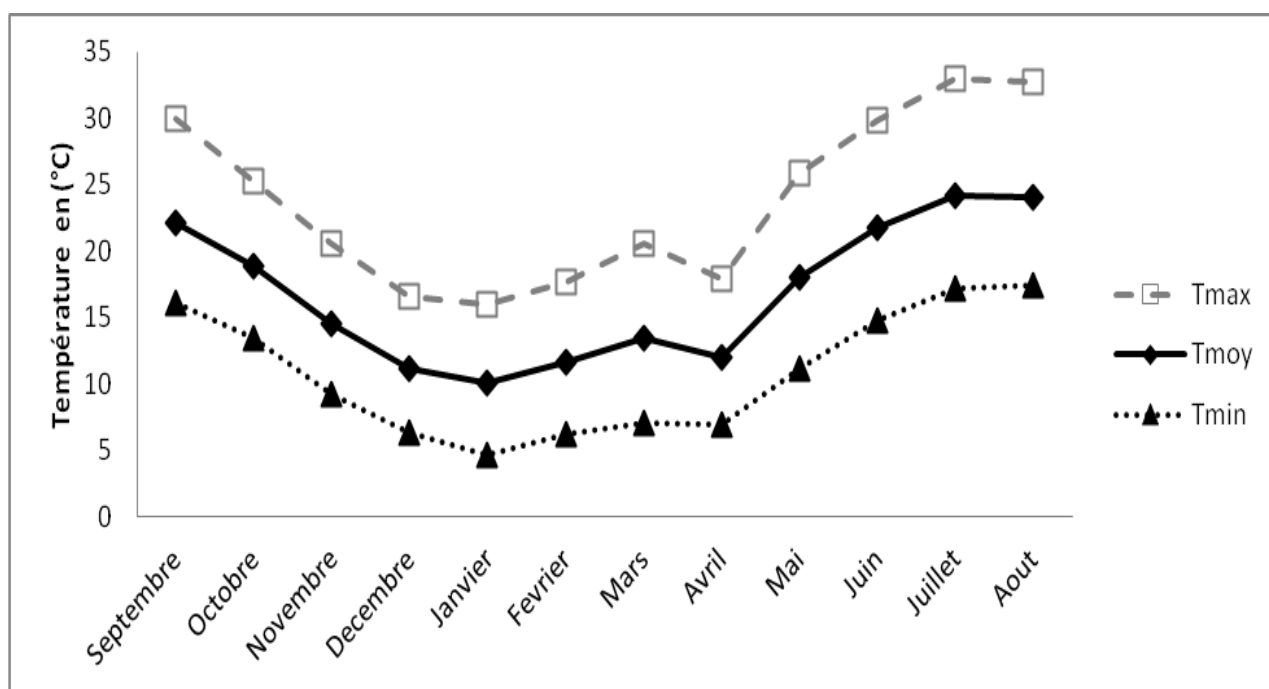


Fig. 7.1. Variation mensuelle de la température mensuelle moyenne, maximale et minimale dans la région d'étude (2004-2011)

L'expérimentation a été réalisée sur une parcelle de 4 ha de pente faible (<5%). Le sol est un Vertisol, riche en argile (>50% d'argile), avec un pH basique et un drainage externe faible (Tableau 7.1).

Tab.7.1. Caractéristiques du sol à l'installation de l'expérimentation en 2004

Profondeur (cm)	Argile	Limon	Sable	pH	M.O	P ₂ O ₅	K ₂ O
	(%)			(1.1 H ₂ O)	(%)	(mg/kg)	
0-20	50	37	13	7,8	1,9	20	323
20-40	51	38	11	8,3	1,4	4	184
40-90	53	35	12	8,6	1,3	1	145

Le dispositif expérimental consiste en une comparaison de deux systèmes de travail du sol: un semis direct (SD) et un semis avec travail conventionnel (SC), pratiqués de 2004 à 2011 sur deux parcelles adjacentes de 100 m de longueur et de 50 m de largeur chacune. Le système conventionnel adopté est celui pratiqué par les agriculteurs de la région et qui consiste en un labour profond du sol durant l'été avec un « stubble plow » permettant l'enfouissement des résidus de récolte, suivi en début d'automne par un deuxième labour au chisel et de deux passages par un instrument à disques pour préparer le lit de semences. Sous semis direct, il n'y a aucune opération de travail ou de préparation du sol. En effet, le semoir utilisé place les semences et les fertilisants sans aucun retournement du sol. Par souci d'homogénéisation, les deux parcelles ont été laissées en jachère deux ans avant l'installation de l'essai. Depuis Septembre 2004, les parcelles reçoivent le même itinéraire technique (rotation, variété, dose de semis, dose et type engrais). En effet, la rotation adoptée est le blé tendre-lentille. Pour la culture du blé (variété Erihane), les parcelles reçoivent la même dose de semis (0,14 t ha⁻¹), la même dose d'engrais (0,15 t ha⁻¹) de type complexe (14-28-14 c.-à-d. 14% d'azote, 28% de phosphore et 14% de potassium). Quant à la lentille (variété Bakria), la dose de semis est de 0,04 t ha⁻¹ et la dose d'engrais est de 0,10 t ha⁻¹ de type complexe (14-28-14). A la récolte, au moins 30% des résidus de cultures ont été maintenus à la surface du sol sous SD.

Si le retournement du sol est souvent pratiqué sous SC pour le contrôle des mauvaises herbes avant l'installation des cultures, en conditions de non-labour, ce contrôle a été réalisé par désherbage chimique. Ainsi, pour le blé, un herbicide à base de Flumetsulame a été utilisé à une dose de 50 ml ha⁻¹ avant le semis. Pour la lentille, elle a été traitée par 3 l ha⁻¹ d'un herbicide à base de Paraquat avant le semis.

En mi-saison, SD et SC reçoivent les mêmes doses de traitements avec 1 l ha⁻¹ d'herbicide, pour la lentille, à base de Fluazifop-P-butyl au début de Février de chaque saison et pour le blé, 50 ml ha⁻¹ de l'herbicide à base de Flumetsulame était apporté en mois de Mars de chaque année.

Pour le contrôle des maladies, un produit phytosanitaire (Furadan 5G) a été utilisé au moment du semis du blé à raison de 25 kg ha⁻¹ pour lutter contre la cécidomyie. Sachant que la variété Errihane a été choisie pour sa résistance à cette maladie. Pour lutter contre les maladies foliaires des céréales, un traitement fongique préventif à base de Propiconazole est utilisé à une dose de 0,5 l ha⁻¹.

7.2.2. Echantillonnage et mesures

7.2.2.1. Paramètres climatiques

Les données climatiques ont été collectées entre 1969 à 2011 au niveau de deux stations météorologiques automatiques installées auprès de la ferme expérimentale de l'INRA dans un rayon de 5 km.

Les moyennes des précipitations journalières ont été transformées en moyennes mensuelles pour faciliter leur interprétation vis-à-vis du cycle végétale des cultures.

Les moyennes mensuelles interannuelles des précipitations sur la période de l'essai (2004-2011), comparées à celles de la période de 1970 à 2011, sont présentées dans Tableau 7.2.

7.2.2.2. Rendements des cultures

A la récolte, cinq placettes de 1m² ont été prélevées de manière aléatoire au sein de chaque parcelle du blé. Pour la lentille, 5 lignes aléatoires de 10 m chacune ont été prélevées dans chaque parcelle (SD et SC). La biomasse et le rendement grain ont été mesurés à partir de ces échantillons collectés.

7.2.3. Analyse statistique

Les données ont été analysées par ANOVA pour l'ensemble des années. Pour chaque année, un test de comparaison de moyens a été utilisé pour séparer entre les traitements SD et SC avec le test (t-Student).

7.3. Résultats et discussion

7.3.1. Conditions climatiques

La zone d'étude, marquée par un climat Méditerranéen, connaît souvent une variabilité climatique importante (Driouech, 2010). Comme le montre Tableau 7.2, durant les 7 ans d'expérimentation, le cumul moyen des précipitations reçues durant la période de croissance (Novembre à Juin) était de 390 mm alors que sur les 41 ans (1970-2011) ce cumul n'est que de 360 mm. Ceci montre que le cumul moyen de pluies durant la saison agricole était plus important durant les derniers 7 ans que durant les 4 dernières décennies.

En effet, durant la période de cette étude, les saisons agricoles ont été différentes de manière prononcée. Sur les 7 ans observés, 3 années ont été relativement moins humides (2004-2005, 2006-2007 et 2007-2008) par rapport aux deux dernières saisons (de 2009 à 2011) qui ont été humides alors que les deux autres (2005-2006 et 2008-2009) ont eu des précipitations plus ou moins proches de la moyenne observée dans la région sur les 41 ans (360 mm).

Le total moyen de pluie qui a été reçue durant la période végétative (PVG) entre Novembre et Février et qui est de l'ordre de 289 mm sur les 7 ans, constitue 74 % du total des pluies reçues

durant la saison agricole. Quant à la période de reproduction et maturité (PRM), la moyenne de pluie reçue est de 95 mm et constitue 24 % par rapport au total moyen de la pluie enregistrée durant l'ensemble du cycle de croissance de la culture (PCR).

Tab.7.2. Pluies moyennes mensuelles reçues entre 2004-2011 et 1970-2011

Période	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Moyen	Moyen
	-	-	-	-	-	-	-	(2004-	(1970-
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2011)	2011)
Novembre	16	75	10	68	83	60	170	69	53
Décembre	67	28	20	15	85	154	125	71	71
Janvier	9	139	18	53	97	225	60	86	61
Février	32	83	29	45	106	91	42	63	50
Mars	29	38	21	13	26	116	56	43	55
Avril	2	17	43	92	8	25	56	35	47
Mai	4	15	18	45	1	20	27	17	19
Juin	2	12	0	0	2	14	10	6	4
Total (PCR)	161	407	159	331	408	705	546	390	360
PVG	124	325	77	181	371	530	397	289	242
PRM	35	70	82	150	35	161	139	95	122
Ecart/PCR	-229	17	-231	-59	18	315	156	--	--

PVG, période végétative (de Novembre à Février) ; PRM, période de maturité (de Mars à Mai) ; PCR, période de croissance de la culture (de Novembre à Juin) ; Ecart (PCR), l'écart entre le total de pluie en (PCR) par année et moyen du total de pluie en (PCR) en (2004-2011)

La variation du climat de la région s'observe clairement durant la saison 2006-2007 avec une faible quantité d'eau (159 mm) et durant 2009-2010 avec un maximum de pluie de 705 mm que la région n'a jamais enregistrée selon les statistiques des 41 ans de pluies. La même variation des précipitations est présente durant la période du développement végétal (PVG), où en année 2006-2007, la pluie reçue était faible (87 mm) alors qu'en année humide (2009-2010), elle a été de l'ordre de 530 mm. Durant cette même année, 161 mm de pluie a été

enregistrée en période de maturité de grain (PRM) alors qu'en année sèche (2006-2007) seulement 72 mm de pluie a été reçue.

Tab.7.3. Paramètre d'analyse de la variance des rendements (grains et biomasse) des cultures blé et lentille en fonction des années (2004-2011) et du type du travail du sol (SD et SC)

Source de variation	Df	Carré des écarts			
		Rendement blé		Rendement lentille	
		Grain	Biomasse	Grain	Biomasse
Année	6	16,096*	31,703*	2,589*	3,631*
Labour	1	1,404*	7,134*	0,011*	0,216*
Année * Labour	6	0,178*	0,384*	0,100	0,230*
Erreur	28	0,040*	0,091*	0,032*	0,020*

(*) indique l'existence d'un effet significatif ($P < 0,05$) par le test F

Cette analyse saisonnière des précipitations permet de conclure que la variabilité climatique annuelle (spécialement les précipitations) est considérable et que le rendement des cultures est significativement affecté par le mode de labour et les pluies annuelles observées entre 2004 et 2011 (Tableau 7.3).

7.3.2. Rendement du blé

7.3.2.1. Rendement grain

Comme le montre Figure 7.2, la variation des pluies reçues durant les 7 ans avait un effet remarquable sur la variation du rendement des cultures. En effet, durant l'année très sèche (2006-2007), le rendement était faible et aucune différence significative n'a été observée entre les deux types de semis. Par contre, en année relativement moins sèche (2007-2008), le rendement sous SD était significativement élevé par rapport au SC. Même constat a été observé durant les années moyennes (2005-2006 et 2008-2009). Par contre en années humides (2009-2010 et 2010-2011), aucune différence significative n'a été observée entre les rendements sous SD et SC.

C'est la texture argileuse du Vertisol et son drainage imparfait qui peuvent expliquer la réduction de rendement suite à un excès d'eau durant les années exceptionnellement humides. En effet, l'excès d'eau favorise la levée des mauvaises herbes et l'infestation de la culture par des maladies cryptogamiques ce qui affecte la maturité des grains et réduit par conséquent le rendement (Gajri et al., 2002). Ceci poussent les agriculteurs à adopter des techniques pour éviter l'effet négatif de l'hydromorphie sur la production du blé dans les Vertisols (Testfay et al., 2011).

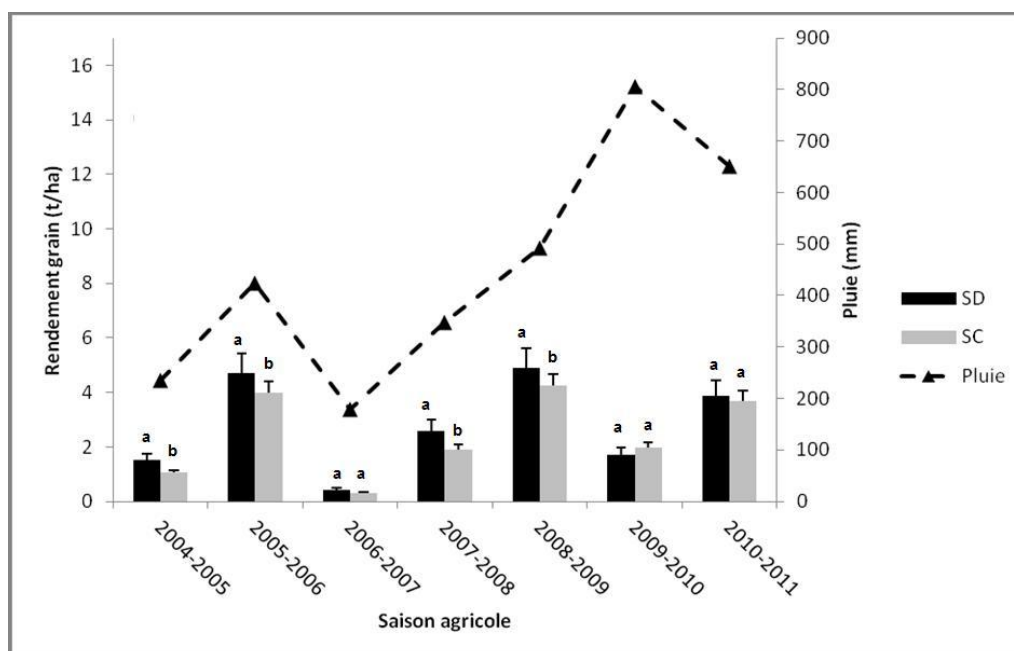


Fig. 7.2. Effet du travail du sol sur le rendement grain du blé en fonction du total de pluie reçu lors de la saison agricole (Novembre-Mai)

De manière générale les rendements en grain du blé sous SD sont égales sinon supérieurs à ceux obtenus sous SC quelques soient les conditions de pluie durant les sept ans d'étude. En conséquence, la culture du blé sous SD et SC n'a pas efficacement utilisé les conditions hydriques des années humides. En outre selon Bouzza (1990), pour assurer une production grain du blé un minimum de cumul de 190 mm est nécessaire. Or, la culture du blé a permis un rendement grain en années sèches (2004-05 et 2006-07), ce qui montre que les eaux

résiduelles en profondeur ont été utilisées et de façon plus conséquente sous SD. Ceci permet de conclure que le SD est capable de réaliser des rendements plus élevés si la gestion des cultures est plus optimale.

7.3.2.2. Biomasse

Le même effet des précipitations sur les rendements grain du blé est observé sur le rendement paille (biomasse). En effet, à l'exception de l'année très humide (2009-2010) où les rendements sous SD et SC étaient identiques, le Vertisol sous SD avait significativement plus de biomasse que sous SC. En plus, en années (2004-2005 et 2006-07), qui étaient des années sèches (moins de 200 mm par rapport à la moyenne), la biomasse sous SD était 0,5 t/ha de plus par rapport au SC. Les résultats obtenus sur 7 ans sur l'effet du SD sur le rendement du blé sont en concordance avec plusieurs travaux de recherche dans la région méditerranéenne. En effet, López-Bellido et al. (1996), De Vita et al. (2007) et Mrabet (2011b) ont trouvé que le SD augmente la production du blé (grain et paille) par rapport au SC. Dans le même sens, Fernández-Ugalde et al. (2009) recommandent aux agriculteurs de la région semi-aride méditerranéenne, d'envisager l'adoption des techniques de semis direct pour réduire l'effet de l'irrégularité des pluies.

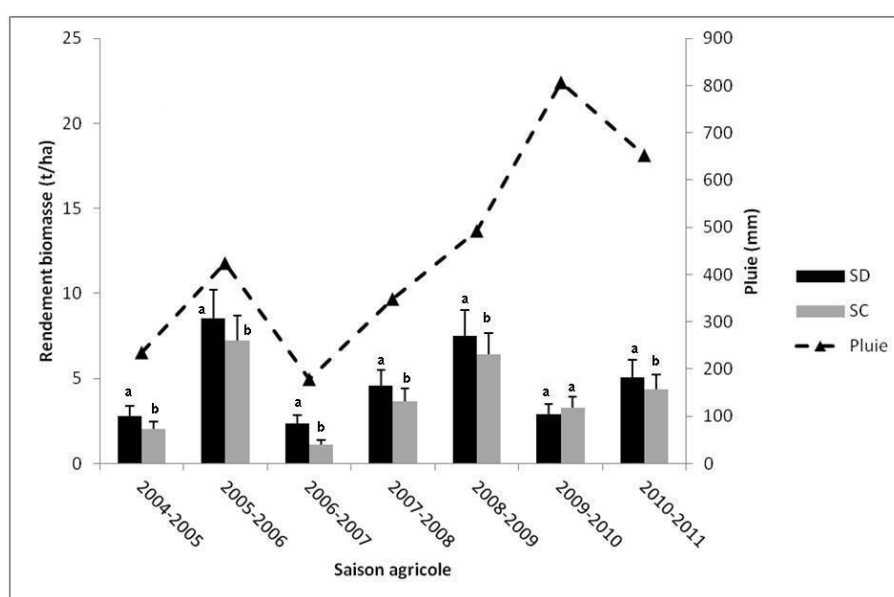


Fig. 7.3 . Effet du travail du sol sur la biomasse du blé en fonction du total de pluie reçu lors de la saison agricole (Novembre-Mai)

7.3.3. Rendement de la lentille

7.3.3.1. Rendement grain

D'après Figure 7.4, il y a une variation considérable des rendements grain en fonction des précipitations reçues. En effet, les rendements ont varié de 1,7 t/ha en année moyenne à 0,1 t/ha en année sèche. Cependant, durant l'année exceptionnellement humide (2009-2010), aucune récolte n'a été obtenue sous les deux systèmes (SD et SC). Ceci peut être expliqué par l'excès d'eau enregistré en mois de Mars 2010 qui a coïncidé avec la période de remplissage des grains. Ceci a sensiblement affecté le rendement de la lentille qui est une culture sensible à l'hydromorphie surtout dans les sols argileux (Masood et al., 2009).

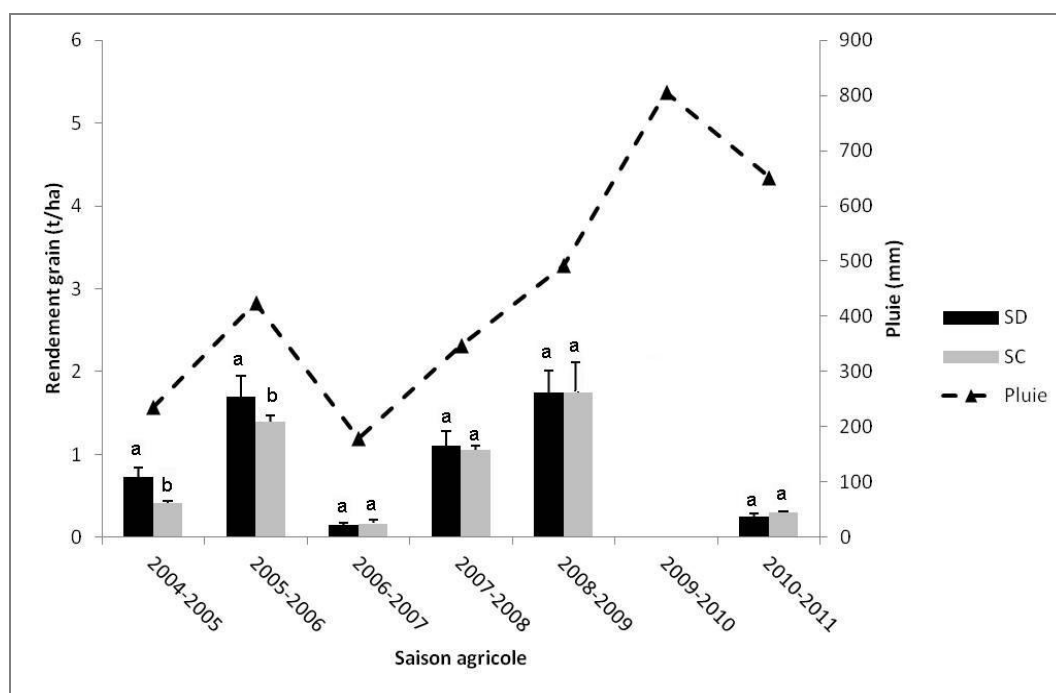


Fig. 7.4. . Effet du travail du sol sur le rendement grain de la lentille en fonction du total de pluie reçu lors de la saison agricole (Novembre-Mai)

De même, durant la saison sèche (2006-2007) le déficit hydrique accentué durant la période végétative (PVG) a réduit le rendement mais avec une légère supériorité en SD. Durant les

autres années d'étude, le rendement était significativement plus élevé sous SD sinon égale à celui obtenu sous SC.

7.3.3.2. Biomasse

Selon Figure 7.5, il ressort, qu'à l'exception des deux dernières années humides (2009-2010 et 2010-2011), la production en biomasse était significativement plus élevée sous SD que sous SC. En année humide, avec l'excès d'eau, on a assisté à envahissement des mauvaises herbes dans les deux systèmes de semis, ce qui a sérieusement affecté les rendements en biomasse.

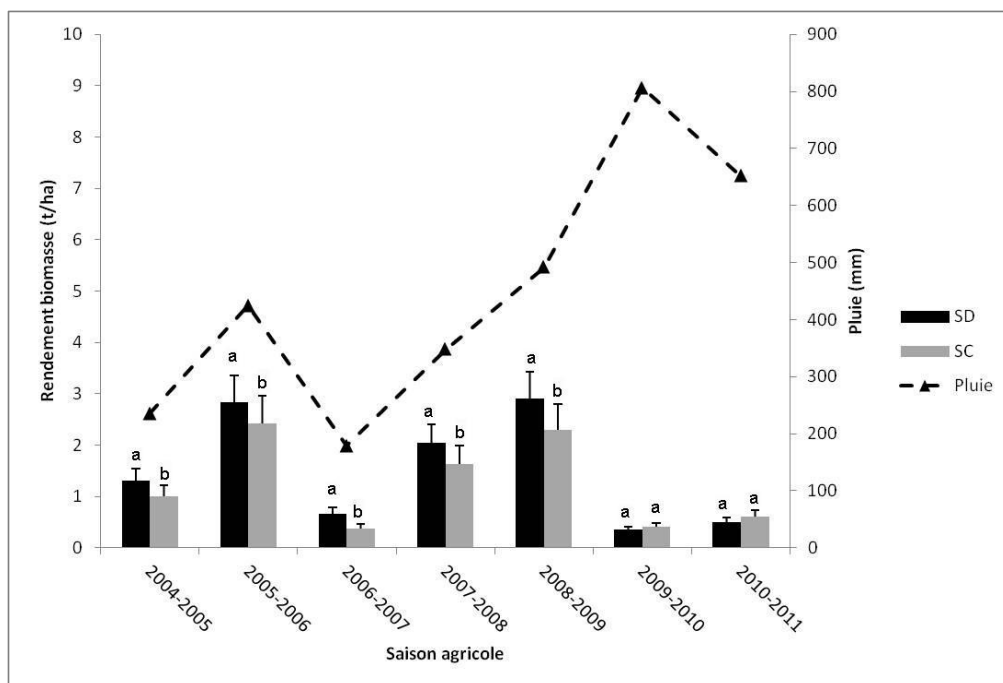


Fig. 7.5. Effet du travail du sol sur la biomasse de la lentille en fonction du total de pluie reçu lors de la saison agricole (Novembre-Mai)

Ces résultats concordent avec ceux rapporté par Kacemi et al. (1995), Stringi et al. (2004) et Pala et al. (2000) qui ont montré que les rendements de la lentille (grain et biomasse) sous SD sont plus élevés par rapport au SC, surtout en milieu semi-aride méditerranéen.

7.3.4. Relation rendement-pluie

Tableau 7.4 montre les coefficients de régression linéaire entre les rendements des cultures (blé et lentille) et les pluies reçues durant l'ensemble de la période de croissance (PCR), durant la période végétative (PVG) et la période de maturité (PRM).

D'après ce tableau, il s'avère que le rendement grain des cultures (blé et lentille) est faiblement corrélé au cumul des pluies reçu le long du cycle de croissance (PCR). Ceci montre que les rendements, dans les zones semi-arides, sont plutôt affectés par la distribution de la pluie durant la saison agricole que par sa quantité (Pala et al., 2000).

Tab.7.4. Les coefficients de régression entre les rendements (grains et biomasse) des cultures (blé et lentille) et le total de pluie reçu durant la période de croissance (PCR), la période végétative (PVG) et la période de maturité (PRM) en semis direct (SD) et en semis conventionnel (SC)

		Rendement grain			Rendement biomasse		
		PCR	PVG	PRM	PCR	PVG	PRM
Blé	SD	0,376	0,636	0,007	0,661	0,668	0,001
	SC	0,431	0,895*	0,005	0,653	0,885*	0,008
Lentille	SD	0,112	0,483	0,107	0,134	0,382	0,008
	SC	0,397	0,692*	0,130	0,351	0,581	0,017

(*) Indique la présence d'une corrélation significative (coefficient de Pearson)

Par contre, le total de pluies reçues durant la période végétative (PVG) est davantage corrélé aux rendements des cultures sous SC que sous SD. Ceci prouve que sous SC, les rendements dépendent plus des précipitations du début du cycle végétal contrairement au SD. En effet, la présence du mulch en surface réduit cette dépendance en conservant l'eau contre l'évaporation et en améliorant son infiltration pour le rendre disponible à la plante durant les périodes sèches du cycle (Mrabet, 2011a).

7.4. Conclusions

A partir de ce travail, on peut conclure que la culture du blé peut être conduite convenablement sous SD dans les conditions méditerranéennes marquées par une variabilité climatique importante. En plus que ce système améliore la qualité du sol, il permet aussi un rendement meilleur sinon égal par rapport au SC. Par contre, la lentille a été plus vulnérable à l'excès de pluie et sa biomasse a été réduite lors des années pluvieuses sous SD comparativement au SC. Ceci remet en cause le choix de cette culture comme rotation avec le blé durant les années humides sur les Vertisols en agriculture de conservation.

Sachant que les années humides sont statistiquement de moins en moins fréquentes dans la région et que les scénarios climatiques prévoient plus d'aridité de ce milieu, on peut conclure que le SD est une alternative durable et prometteuse pour réduire la vulnérabilité des filières (céréalières-légumineuses) aux variations climatiques et pour produire de manière durable sur ces Vertisols méditerranéens.

7.5. Références

- Aboudrare, A., Debaeke, P., Bouaziz, A., Chekli, H. 2006. Effects of soil tillage and fallow management on soil water storage and sunflower production in a semi-arid Mediterranean climate. *Agr. Water Manage.* 83, 183–196.
- Ahmad, N., 1996. Occurrence and distribution of Vertisols, in. Ahmad, N. and Mermut, A. (eds), *Vertisols and Technologies for Their Management*. Elsevier, Amsterdam, pp.1-41.
- Álvaro-Fuentes, J., Arrúe, J.L., Gracia, R. & López, M.V. 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation. temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma*. 145,390–396
- Bouzza, A.1990. Water conservation in wheat rotations under several management and tillage systems in semi arid areas. Ph.D. University of Nebraska, Lincoln, NE USA, p.200.
- Deckers, J., Spaargaren, O. & Nachtergaele, F. 2001. Vertisols. Genesis, properties and soilscape management for sustainable development. FAO, Rome, Italy. 20pp.
- De Vita, P., Di Paolo, E., Fecondo, G., Di Fonzo, N. & Pisante, M. 2007. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil.Till. Res.*, 92, pp. 69-78.
- Diaz-Ambrona, C.G.H., O’Leary, G.J., Sadras, V.O., O’Connell, M.G. & Connor, D.J. 2005. Environmental risk analysis of farming systems in a semi-arid environment. Effect of rotations and management practices on deep drainage. *Field Crop Res.* 94, 257–271.
- Driouech, F., Déqué, M. & Sánchez-Gómez, E. 2010. Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Glob. Planet Change*. Volume. 72, 1-2. Publisher. Elsevier B.V. 1-10.
- Fernández-Ugalde, O., Virto, I., Bescansa, P., Imaz, M.J., Enrique, A. & Karlenb, D.L., 2009. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils. *Soil. Till. Res.* 106, 29-35.

- Gajri, P.R., Arora, V.K. & Prihar, S.S. 2002. Tillage for sustainable cropping. International Book Distributing Company, Lucknow, India.
- Kacemi, M., Peterson, G.A. & Mrabet, R. 1995. Water conservation, wheat-crop rotations and conservation tillage systems in a turbulent Moroccan semiarid agriculture. p. 83-91. *In* El Gharroux et al. (eds). Conference on Challenges in Moroccan Dryland Agriculture. INRA, Rabat, Morocco.
- Kirkegaard, J.A., Munns, R., James, R.A., Gardner, P.A. & Angus, J.F. 1995. Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping. Soil biological factors limit growth under direct drilling. *Aust. J. Agric. Res.* 46, 75–88.
- Lal, R. 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture. Tropics versus temperate environments. *Adv. Agron.* 42, 85–197.
- Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P. & Boscolo, R. 2006. Mediterranean Climate Variability. Elsevier (eds). Amsterdam. ISBN.0-444-52170-4, 438pp.
- López-Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J.E. & López-Bellido, F.J. 1996. Long-term tillage, crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under Mediterranean conditions. *Agron. J.* 88, 783-791.
- Masood, A.S.K.K., Pramanik, S. C. & Ali, M. O. 2009. Cropping systems and production agronomy. Erskine et al. (eds). 2009. Introduction in the lentil botany. Production and Uses, CABI International, UK.
- Moreno, F., Arrúe, J.L., Cantero-Martínez, C., López M.V., Murillo, J.M., Sombrero, A., López-Garrido, R., Madejon, E., Moret D. & Alvaro-Fuentes, J. 2011. Conservation agriculture under Mediterranean conditions in Spain. *Biodivers. Biofuel. Agroforest. Conserv. Agric. Sust. Agric. Rev.* 5, 175–193.
- Moret, D. & Arrúe J.L. 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil. Till. Res.* 96, 103–113

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

Mrabet, R. 2011a. Effects of residue management and cropping systems on wheat yield stability in a semiarid Mediterranean clay soil. *American Journal of Plant Sciences*. 2. 202-216.

Mrabet, R. 2011b. No-tillage agriculture in West Asia & North Africa. In. Rainfed farming systems. Tow, P.G., Cooper, I.M., Partridge, I. & Birch, C.J. (Eds). Springer, Dordrecht Netherlands, pp. 1015-1042. ISBN. 978-1-4020-9131-5.

Ouassou, A., Amziane, T. & Lajouad, L. 2006. State of natural resources degradation in Morocco and plan of action for desertification and drought control. *In Desertification in the Mediterranean Region. A Security Issue*, (eds). Kepner, W. G. Rubio, J. L. Mouat, D. A. & Pedrazzini, F. Dordrecht, Netherlands. Springer. 253p.

Pala, M., Harris, H.C., Ryan, J., Makboul, R. & Dozom, S. 2000. Tillage systems and stubble management in a Mediterranean-type environment in relation to crop yield and soil moisture. *Experi. Agri.* 36, 223-242.

Ryan, J., De Pauw, E., Gomez, H. & Mrabet, R. 2006. Drylands of the Mediterranean Zone. Biophysical Resources and Cropping Systems. *In Dryland Agriculture*. Peterson, A. et al. (eds). American Society of Agronomy Monograph. 23, 577-624.

Stringi, L., Giambalvo, D., Trapani, P., Scarpello, C. & Attardo, C. 2004. Effect of soil management techniques on performance of different grain legumes in a Mediterranean environment. *Options Méditerranéennes*. 60, 79-83.

Syers, J. K., Penningde Vries, F. T. & Nyamudeza, P. 2001. The Sustainable Management of Vertisols. (eds). CAB International Publishing, Wallingford.

Tesfay, A., Cornelis, W.M., Nyssen, J., Govaerts, B., Bauer, H., Gebregziabher, T., Oicha, T., Raes, D., Sayre, K.D., Haile, M. & Deckers, J., 2011. Effects of conservation agriculture on

runoff, soil loss and crop yield under rainfed conditions in Tigray, northern Ethiopia. *Soil Use Manage.* 27, 404–414.

Yule, D. F. & Willcocks J. T. 1996. Tillage and cultural practices. *In* Vertisols and Technologies for Their Management. (eds). Ahmad, N. & Mermut, A. Elsevier, Amsterdam, ISBN. 0444-88789. p.1-41.

Warkentin, B.P. 2001. The tillage effect in sustaining soil functions. *J. Plant.Nutr. Soil Sci.* 164, 345–350.

Conclusions générales

L'objectif global assigné à cette recherche est de contribuer à améliorer les connaissances sur le comportement des sols sous l'agriculture de conservation (AC), comme mode d'adaptation au changement climatique en milieu Méditerranéen. Elle a été orientée essentiellement vers l'étude de l'effet du semis direct (SD), par rapport au semis conventionnel (SC), sur les propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques des Tirs et sur leurs productions agricoles.

Le premier chapitre a mis l'accent sur les acquis de recherche de l'agriculture de conservation en milieu aride marocain durant les 3 dernières décades alors que le deuxième chapitre a présenté les caractéristiques des Tirs du Maroc en analysant leur degré de similitude et différence par rapport aux autres Vertisols du Monde.

Les cinq derniers chapitres dressent les résultats expérimentaux obtenus lors des travaux, de terrain et laboratoire, entreprises dans le cadre de cette thèse. En guise de conclusion, on peut résumer les résultats saillants de ce travail de recherche selon les points suivants :

✎ **Effet du semis direct avec ou sans résidus sur l'érosion hydrique du sol:** le maintien des résidus à la surface du Tirs sous semis direct assure une protection contre l'impact des gouttes de pluie et réduit ainsi l'érosion du sol. Ceci a été confirmé suite à une campagne de mesures par simulation de pluie sur des Tirs sous SD et on a montré l'importance du maintien des résidus à la surface du SD pour réduire les pertes en terres et le ruissellement hydrique. En effet, après deux simulations successives des précipitations de 36 et 60 mm h⁻¹, le taux de ruissellement était 3 à 4 fois inférieur sous SD50 (SD avec 50% de résidus) que sous SC. De même, une réduction de 50% des pertes en sol a été observée sous SD50 par rapport au SC. Ce résultat est important car il a permis de quantifier l'érosion hydrique sur les Tirs sous différents systèmes de labour et ces données sont nécessaires pour une éventuelle modélisation de l'érosion dans les Tirs.

✎ **Effet du semis direct sur la stabilité des agrégats des Tirs:** cette recherche a montré que le labour intensif modifie les propriétés physiques du sol et détruit la cohésion des agrégats provoquant une structure instable et vulnérable à l'érosion hydrique. Sous SD, par contre, les agrégats du sol sont plus stables permettant une meilleure rétention d'eau du sol. En plus, on a montré que les agrégats sous SD sont plus stables si on maintient environ 50% de résidus à la surface de ces Tirs méditerranéens. Ce résultat confirme l'importance du maintien des résidus de cultures sous SD avec un seuil déterminé au niveau de ce milieu agro-pédologique.

✎ **Effet du semis direct sur la teneur en eau des Tirs:** en climat semi-aride du Maroc Central, les résultats expérimentaux de ce travail ont permis de conclure le constat suivant : malgré que la densité apparente fût élevée et que la conductivité hydraulique était souvent faible dans les Tirs sous SD par rapport au SC, la teneur en eau était supérieure sinon égale sous SD par rapport au SC. En plus, on a expliqué que la présence de 50% mulch à la surface du sol non labouré réduit significativement le potentiel matriciel de l'eau à la surface (0-20 cm) du Tirs, ce qui se traduit par une meilleure rétention de l'eau du sol. En effet, suite au suivi de ce potentiel matriciel pendant des mois durant le milieu du cycle de croissance du blé, on a observé qu'un sol sous SD avec 50% de mulch en surface se dessèche tardivement jusqu'à 3 semaines après le dessèchement d'un sol sous SC.

✎ **Effet du semis direct sur quantité et la qualité de la matière organique:** les sols du Maroc ont généralement des faibles teneurs en matière organique (MO). Ceci est dû au labour intensif favorisant une minéralisation rapide du carbone organique et l'exportation abusive de la biomasse sans apport d'amendements organiques. Cette recherche a démontré que l'adoption du SD est capable de renverser l'appauvrissement des sols en matières organiques et que le degré de cet enrichissement en MO dépend de la texture des sols. En effet, une augmentation d'environ 10% du stock de la MO sur une profondeur de 0-30 cm a été

observée dans les sols non labourés à texture argileuse (Tirs) par rapport au SC. Cependant, pour les sols à texture moins fine de la zone d'étude (Luvisol), aucune différence significative n'a été observée entre les deux traitements (SD et SC) après cinq années d'expérimentation.

Par ailleurs, l'analyse de la qualité chimique de cette MO a montré que les Tirs non labourés (SD) ont significativement plus de substances humiques de formes stables (acide humiques et humine) que de formes instables (acides fulviques), contrairement au Tirs labourés (SC). Par ailleurs, ces résultats sont importants pour la modélisation, à court et à long terme, du stock du carbone organique sous SD et SC des sols dans la région d'étude.

✎ **Effet du semis direct sur la quantité d'émission du CO₂ du sol:** ce travail de recherche nous a permis de confirmer, par des mesures in situ et à différentes saisons (automne et printemps), que l'émission de CO₂ est significativement plus faible sous SD que sous SC en zone à climat semi-aride. Ceci est en concordance avec la plupart des mesures effectuées dans les pays à climat tempéré, ce qui permettra d'encourager la dissémination du SD au Maroc grâce à ces faibles émissions de CO₂ du sol à l'atmosphère comme technique d'adaptation aux changements climatiques. Ces données se font rares dans la région Méditerranéenne et elles sont d'une importance capitale pour convaincre les décideurs qui s'intéressent au « Marché carbone » par l'impact environnemental positif du SD par rapport au SC

✎ **Effet du semis direct sur le rendement des céréales et légumineuses dans les Tirs :** après le suivi et l'analyse de 7 années de mesures des rendements de cultures (blé et lentille) sous SD et SC, on a pu conclure qu'en plus que le système SD améliore la qualité du sol, il permet aussi un rendement meilleur sinon égal de la culture du blé, par rapport au SC. Par contre, la culture de la lentille a été plus vulnérable à l'excès de pluie et sa biomasse a été réduite lors des années pluvieuses sous SD comparativement au SC. Ceci remis en cause le choix de cette culture comme rotation avec le blé durant les années humides sur les Vertisols non labourés. Sachant que les années humides sont statistiquement de moins en moins

fréquentes dans la région d'étude et que les scénarios climatiques prévoient plus d'aridité de ce milieu, on peut conclure que le SD est une alternative prometteuse pour réduire la vulnérabilité des filières céréalières aux variations climatiques qui marque la zone d'étude et pour produire de manière durable sur ces Vertisols méditerranéens.

Enfin comme perspectives et compléments à ce travail, plusieurs axes de recherche peuvent être proposés pour expliquer plusieurs points qui sont encore ambigus concernant l'effet du SD sur les propriétés des sols. Parmi les axes de recherche prioritaires à explorer sont:

- La modélisation de l'effet du SD sur la séquestration du carbone organique dans les Vertisols en tenant compte des scénarios climatiques développés pour le Maroc Central. Ceci afin d'analyser, à court et à long terme, l'apport SD dans les Tirs comme outil d'adaptation aux changements climatiques dans cette région méditerranéenne.
- La modélisation des paramètres de l'érosion sous SD et SC pour spatialiser et identifier les sols vulnérables à l'érosion hydrique et proposer des mesures de conservation en tenant compte du mode du travail du sol et de la gestion des résidus des cultures.
- Un intérêt particulier doit être donné à l'étude de l'effet du SD avec et sans résidus sur la fertilisation azotée et phosphatée en tenant compte de la minéralogie des Tirs.
- L'étude, à court et à long terme, de l'effet du SD, avec ou sans résidus, sur l'activité biologique sous Tirs et sous d'autres types de sols pour mieux comprendre le fonctionnement du sol sous ce système de culture.
- Étant donné que le traitement des mauvaises herbes sous SD est basé essentiellement sur les herbicides, une recherche doit être lancée pour étudier l'effet de ces herbicides sur les propriétés des sols en générales et sur les Tirs en particuliers, ainsi que la

caractérisation de leurs mécanismes de transfert dans le sol pour évaluer leurs impacts sur l'environnement en fonction du temps.

- Une recherche sur les Tirs sous SD en système intensif irrigué serait souhaitable pour avoir des résultats sur ce système dans des milieux contrastés.
- Enfin, une analyse des facteurs biotiques et abiotiques des sols (Tirs ou autres) capable de limiter ou d'améliorer la dissémination de la technologie du SD auprès des agriculteurs en incluant des études socio-économiques et environnementales dans les régions semi-arides Méditerranéennes.

Annexes

Description de certains profils pédologiques des Tirs du Maroc

➤ Profil: P1 (région: GHARB)

<u>Localisation:</u>	X: 409 500 Y: 423 700 Z: 4 m
<u>Site:</u>	Plaine du Gharb (périmètre irrigué)
<u>Végétation:</u>	Céréales
<u>Climat:</u>	Subhumide
<u>Roche-mère:</u>	Formations argileuses et calcaires rharbiennes

Description du profil:

0 – 10 cm: gris brun clair (2.5 Y 6/2), argilo limoneux, effervescence généralisée, structure stratifiée en plaquettes fendillées, limite graduelle.

10 – 30 cm: brun gris foncé (2.5 Y 4/2) vers le haut de l'horizon, plus foncé vers le bas (2.5 Y 3/2). Argilo limoneux, effervescence généralisée, structure massive, assez cohérente à sur structure polyédriques, dur, compact, présence de racine, limite graduelle.

30 – 70 cm: brun gris foncé (2.5 Y 4/2) en haut, la couleur devient progressivement brun gris, en profondeur, très foncé (2.5 Y 3/2) et gris olive foncé (5 Y 3/2) à partir de 50 cm. Argileux, effervescence généralisée jusqu'à 50 cm, moins riche en calcaire en bas de l'horizon. Structure massive à tendance prismatique. Dur, compact à faces de glissement. Présence des amas calcaires à partir de 50 cm, limite graduelle.

70 – 85 cm: fond gris foncé (5 Y 4/1) avec tache plus claires. Argileux, effervescence généralisée. Structure massive, à tendance tétraédrique, à faces de glissement. Dur, compact, présence des amas calcaires dans les fentes, limite graduelle.

85 – 125 cm: gris très foncé (5 Y 3/1). Argileux, effervescence généralisée en haut, moins riche en calcaire en bas. Structure massive à tendance tétraédrique, à faces de glissement. Durs, compacts et lourds avec amas calcaires, limite graduelle.

≥ 125 cm: gris très foncé (5 Y 3/1). Argileux, faiblement calcaire en haut; non calcaire vers le bas de l'horizon, sauf très localement. Structure prismatique et cubique à tendance tétraédrique avec faces de glissement. Dur, compact, amas et granules calcaires assez disséminés, à partir de 123 cm. Forment une zone d'accumulation entre 125 et 150 cm de profondeur. Apparition de « Pseudogley » à taches ferrugineuses à partir de 170 cm.

Importantes caractéristiques physico-chimiques du profil (P1)

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limon (%)	Sable fin (%)	Sable grossier (%)	CaCO ₃ Total (%)
0 - 10	57	36	5	1	11
10--30	62	28	8	2	13
30-70	71	22	5	2	13
70-85	75	20	3	2	13
85-125	78	17	4	1	8
>125	70	24	4	2	5
Profondeur (cm)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	MO (%)	P ₂ O ₅ mg/kg sol	K ₂ O mg/kg sol
0 - 10	8,31	7,05	1,88	t	347,5
10--30	8,46	7,01	1,55	t	230,7
30-70	8,64	6,90	1,35	t	244,6
70-85	8,73	7,08	1,08	t	225,2
85-125	8,98	7,15	2,42	t	189,0
>125	8,20	7,38	0,27	t	97,5



Profil: P1 (région: GHARB)

Classification:

WRB: (Calcic) Mollic Stagnic VERTISOL (Calcaric Eutric Novic)
CPCS: Vertisol à drainage externe réduit (Tirs)

➤ **Profil : P2 (région: Zaer)**

<u>Localisation:</u>	X: 377 850 Y: 335 000 Z: 392 m
<u>Site:</u>	Plateau de Merchouch
<u>Topographie:</u>	Plane, microrelief en gilgai
<u>Végétation:</u>	Céréales et légumineuses
<u>Roche-mère:</u>	Marne
<u>Drainage:</u>	Réduit

Description du profil:

0 – 30 cm gris noirâtre, 5 Y 3/2 (sec), 4/2 (humide) ; peu humifère; argileux, massif, assez ferme et peu cohérent, plastique (en haut de l'horizon); dur, très cohérent, structure polyédrique grosse à tendance motteuse (en bas), larges fentes de retrait, se joignant en un réseau hexagonal plan, (slickensides) nombreuses et entrecroisées, quelques racines et nombreuses radicelles, quelques éléments pisolithes et concrétions ferro-manganiques brunes et brun noirâtres très dures, ennoyées dans la masse argileuse ; limite progressive et régulière.

30 – 90 cm: 5 Y 4/2 (sec), 5/2 (humide); gris, peu humifère ; matières organiques uniformément réparties dans l'horizon et fortement liées aux matières minérales (complexe argilo-humique stable), argileux ; massif, peu ferme, peu cohérent, argile collante et plastique, faible porosité (en haut); structure polyédrique grosse à tendance prismatique et cubique, très cohérent, dur, porosité tubulaire, larges fentes de retrait verticales et subhorizontales, (slickensides) nombreuses et entrecroisées; quelques concrétions et pisolithes ferro-manganiques dures, rares petits galets et grains de quartz cariés, limite nette et irrégulière.

90 – 120 cm: 5 Y 6/4 (sec), 7/7 (humide) ; gris clair, très peu humifère, argileux, cohérent, assez dur, peu poreux ; massif, peu ferme, plastique ; fentes verticales peu nombreuses et peu larges (1 cm), (slickensides) peu nombreuses mais étendues et gauchies, quelques pisolithes ferro-manganiques, radicelles peu nombreuses ; limite nette, irrégulière.

120 – 140 cm: 10 YR 6/6 ; gris-beige, argileux, très peu humifère, calcaire, massif ; polyédrique; peu poreux, radicelles rares, quelques taches calcaires tendres ; limite nette, sinusoïdale (gilgai).

> 140 cm: calcaire dur, peu perméable (molasses miocènes).

Importantes caractéristiques physico-chimiques du profil (P2)

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limon fin (%)	Limon grossier (%)	Sable fin (%)	Sable grossier (%)	CaCO₃ Total (%)
0-30	40	10	36,5	8,5	5	1,2
30-90	45	15	28,0	7,4	4,6	0
90-120	47,5	5	35,1	7,2	5,2	0
Profondeur (cm)	pH (H₂O)	pH (KCl)	MO (%)	P₂O₅ mg/kg sol	K₂O mg/kg sol	
0-30	5,30	4,00	1,20	68,3	202,9	
30-90	7,09	5,60	1,09	8,9	133,5	
90-120	7,37	5,82	0,63	4,6	139,0	



Profil : P2 (région: Zaer)

Classification:

WRB: Mollic Stagnic Grumic VERTISOL (Eutric, Bathyfractepetrocalcic)

CPCS: Vertisol modal à drainage externe réduit

➤ Profil: P3 (région: Chaouia)

<u>Localisation:</u>	X: 377 500 Y: 243 000 Z: 370 m
<u>Site:</u>	Sur la route N°7 "Settat – Mechraa ben Abbou"
<u>Végétation:</u>	Légumineuse
<u>Climat:</u>	Semi-aride
<u>Drainage:</u>	Réduit
<u>Roche -mère:</u>	Argile rouge et décalcifié et limon du quaternaire

Description du profil:

0 – 15 cm: Brun foncé 5YR 3/2 (sec), 3/4 (humide), matière organique décelable bien incorporé à la matière minérale, argileux, polyédrique associée à grumeleuse fine, poreux, peu calcaire, friable, présence de fentes de retraits en surface, racines fines au niveau des fentes de retraits, limite peu nette.

15 – 45 cm: Brun foncé 5YR 3/3 (sec) 3/4 (humide), matière organique bien humifiée, argileux, prismatique moyenne à grossière nette et bien développée, poreux, calcaire, présence de fente de retraits de 0,5 à 1 cm, facettes de glissement, collant plastique, transition graduelle et irrégulière.

45 – 110 cm: Humide, Brun. 5 YR 4/4, argileux prismatique moyenne, peu poreux, calcaire compact, cohésion forte, dur, plastique et collant, facettes de glissement, transition graduelle et irrégulière.

110 – 130 cm: Humide, rouge ocre pâle 5YR 6/6, argilo-limoneux, massive, peu poreux, calcaire, collant et plastique.

Importantes caractéristiques physico-chimiques du profil (P3)

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limon fin (%)	Limon grossier (%)	Sable fin (%)	Sable grossier (%)		
0-15	30	38,7	9,5	16,4	5,4		
15-45	53,7	24,9	6,7	11,2	3,5		
45-110	44,4	25,5	13,4	12,7	4		
110-130	55,5	13,3	16	11,9	3,3		
Profondeur (cm)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	MO (%)	P ₂ O ₅ mg/kg sol	K ₂ O mg/kg sol	CaCO ₃ Total (%)	CaCO ₃ Actif (%)
0-15	8,50	6,94	2,08	10,0	194,6	3,5	1,1
15-45	8,59	6,93	2,17	7,3	166,8	7,5	2,4
45-110	8,63	7,06	1,74	0,8	130,6	10,3	3,2
110-130	8,92	7,46	0,48	0,3	69,5	11,7	5,2



Profil: P3 (région: Chaouia)

Classification:

WRB: Mazic VERTISOL (Calcaric Humic (Eutric) Chromic Bathycalcic)
CPCS: Vertisol modal

➤ Profile: P4 (région: Tadla)

<u>Localisation:</u>	X: 182 650 Y: 205 250 Z: 180 m
<u>Topographie:</u>	Pente: 1 à 2%
<u>Végétation:</u>	Céréaliculture
<u>Climat:</u>	Semi-aride à aride
<u>Drainage:</u>	Bien drainé
<u>Roche mère:</u>	Calcaire friable (marne)

Description du profil:

0 – 15 cm: brun foncé 7.5 YR 3/2, calcaire (effervescence moyenne), structure polyédrique, friable, argileux, poreux, 2 to 5% de gravier (silex et calcaire friable), matière organique décelable, quelques racines végétaux fines, limite nette.

15 – 40 cm: Brun foncé 7.5 YR 3/3, calcaire (effervescence moyenne), structure polyédrique, argileuse, faible présence de gravier (silex et calcaire friable), matière organique décelable, quelques racines végétaux fines, limite nette.

40 – 80 cm: brun foncé à brun rougeâtre 7,5 YR 4/2, calcaire (effervescence rapide et généralisée), effervescent, argileux, structure polyédrique, friable, concrétions rougeâtres (5 YR 3/2), faible présence de gravier (silex, calcaire), « slickensides» oblique, limite graduelle.

80 – 140 cm: identique à l'horizon supérieure, avec des concrétions rougeâtres (5 YR 3/2), limite nette.

140 – 170 cm: très calcaire, friable avec des nodules calcaires.

Importantes caractéristiques physico-chimiques du profil (P4)

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limon fin (%)	Limon grossier (%)	Sable fin (%)	Sable grossier (%)	CaCO ₃ Total (%)
0-20	47,6	7,5	6,7	26,8	11,4	0,5
20-40	45,6	2,5	14,6	26	11,3	0,9
40-80	35	5	22,9	18,6	18,5	2,1
80-130	37,5	10	17,3	18,1	17,1	4,2
130-170	39	10	21,2	21,5	8,3	3,7
Profondeur (cm)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	MO (%)	P ₂ O ₅ mg/kg sol	K ₂ O mg/kg sol	
0-20	7,51	6,16	1,63	22	380,8	
20-40	8,19	6,60	1,68	9	214,0	
40-80	8,50	7,19	1,64	4	166,8	
80-130	9,34	7,47	1,33	4	164,0	
130-170	9,38	7,78	0,75	3	194,6	



Profile: P4 (région: Tadla)

Classification:

WRB: Mollic Sodic Grumic VERTISOL (Calcaric (Eutric) Bathycalcic)

CPCS: Vertisol á drainage externe possible

Méthodes d'analyses au Laboratoire

Les différentes analyses physico-chimiques du sol ont été réalisées au sein des Laboratoires de physique et chimie des sols de l'Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles (CRRAR/INRA Maroc).

1) pH du Sol

Le pH a été déterminé à l'aide d'un pH-mètre. Le pH (pH eau) de l'échantillon du sol est déterminé par sa mise en suspension dans l'eau distillée avec un rapport sol/eau (1/1). L'acidité d'échange est déterminée par ajout de KCl dans la suspension (pH KCl).

2) Matière Organique

Le dosage du carbone dans le sol est réalisé par l'oxydation du carbone organique à froid selon la méthode Walkley-Black (Black, 1965), par un excès de bichromate de potassium (1N) en milieu acide sulfurique jusqu'au dégagement du CO₂. La fraction de bichromate non réduite peut être dosée en retour par une solution de sel de Mohr en présence du diphénylamine. Le taux de matière organique est estimé en multipliant le pourcentage du carbone organique par 1,724.

3) Potassium échangeable

L'extraction des bases échangeables a été réalisée par une solution normale d'acétate d'ammonium CH₃COONH₄ à pH 7 (Black, 1965). Le dosage du potassium est réalisé au moyen d'un photomètre à flamme.

4) Phosphore assimilable

Le phosphore assimilable a été déterminé par la méthode Olsen qui consiste à extraire le phosphore au moyen d'une solution de bicarbonate de sodium (0.5 N à pH 8.5). Le dosage est effectué par colorimétrie.

5) Granulométrie

L'analyse granulométrique consiste à séparer les différentes fractions minérales du sol et les évaluer en pourcentages pondéraux de l'ensemble de l'échantillon. L'analyse granulométrique a été réalisée par densimétrie (Black, 1965).

6) Calcaire total et actif

Outre les déterminations des paramètres pH, teneurs en matière organique, P_2O_5 , etc., deux autres paramètres permettent d'affiner le diagnostic d'un sol calcaire : il s'agit du calcaire total et calcaire actif. Les deux méthodes les plus utilisées au Maroc sont la méthode volumétrique (calcimètre de Bernard) pour déterminer le calcaire total et la méthode (Drouineau) pour mesurer la teneur en calcaire actif (Baize, 1988).

Référence

Baize, D. 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. (eds.) INRA. Paris.France. 172p.

Black, N.C. 1965. Methods of soil analysis. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. USA. 1572p.

Mr. **Rachid MOUSSADEK** est né le 26 Avril 1974 à Salé (Maroc). En 1999, il a obtenu son diplôme d'Ingénieur d'Etat en Agronomie (Option Science du Sol) à l'Institut Agronomique & Vétérinaire Hassan II de Rabat. En 2000, il a été recruté comme chercheur à l'Institut National de la Recherche Agronomique à Rabat (INRA). Il a été chargé des Laboratoire de la cartographie du sol et du physique du sol.

Durant l'année académique 2004-2005, il a suivi des études spécialisées en Agro-Climatologie à **l'Université de Liège**. En Octobre 2006, Mr. Rachid Moussadek a été inscrit comme étudiant doctorant en Science de la Terre, **Laboratoire des Sciences du Sol**, Département de Géologie et de Pédologie, Faculté des Sciences, **Université de Gand**.

Mr. Rachid Moussadek a participé activement à divers symposium et congrès internationaux, notamment ISCO 2006 & 2008 (International Soil Conservation Organisation), AGRO 2010 (Montpellier)...etc.

Présentement, Mr. Moussadek est (co-)auteur de plusieurs travaux de recherche et articles publiés dans des journaux scientifiques en relation avec sa thèse:

✉ Mrabet R., Moussadek R., Fadlaoui A. & Van Ranst E. 2012. **Conservation agriculture in dry areas of Morocco**. Field Crops Research. 132, 84-94.

✉ Moussadek R., Mrabet R., Zante P., Lamachere J-M., Pepin J.-Y., Le Bissonnais Y., Ye L., Verdoodt A. & Van Ranst E.. 2011. . **Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen..** Canadian Journal of Soil Science. 91:(4) 627-635.

✉ Moussadek R., Mrabet R., Dahan R., Douaik A., Verdoodt A., Van Ranst E. and Corbeels M. 2011. **Effect of tillage practices on the soil carbon dioxide flux during fall and spring seasons in a Mediterranean Vertisol**. Journal of Soil Science and Environmental Management. 2 (11): 362-369.

✉ Moussadek R., Mrabet R., Verdoodt A. & Van Ranst E. 2010. **Effect of conservation agriculture on soil properties in Mediterranean conditions**. In Agro2010 Congress. August 2010, Agropolis, Montpellier, France.

- Moussadek R., Mrabet R., Verdoodt A., Ye L., Badraoui M., Van Ranst E. 2008. **Effect of No-Tillage on Vertisol hydrodynamic properties**. In The Soil Of Tomorrow- Soil Changing in a Changing World. EUROSOIL Congress, August 25–29, 2008. Technical University Vienna, Austria.

Contact : ✉ **INRA/ Centre Régionale de la Recherche Agronomie de Rabat,**
B.P 6356- Rabat Institut , 10101, Rabat, Maroc
Tél : **+212 6 60 15 72 33**
Fax : **+212 5 37 77 55 30**
✉ rachidmoussadek@yahoo.fr

Au Maroc, la pression démographique a accentué l'utilisation intensive des terres agricoles, entraînant une détérioration rapide de la qualité des sols et la réduction de leurs productivités. L'agriculture de conservation (AC) constitue une alternative prometteuse pour produire plus et de manière durable sur des sols fragilisés tels que les Vertisols (ou Tirs) qui font partie des sols surexploités au pays vu leur fort potentiel de production malgré leur grande susceptibilité à la compaction et à l'érosion hydrique quand ils subissent des opérations de labour requérantes. Cette recherche a été entreprise dans le but de contribuer à améliorer les connaissances sur le comportement des Tirs sous AC, comme mode d'adaptation au changement climatique dans un environnement Méditerranéen. Elle a été orientée essentiellement vers l'étude de l'impact du AC ou du semis direct (SD), avec ou sans résidus, sur les propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques des Tirs, sur leurs érodibilités et sur leurs productions agricoles.

Par simulation de pluie sur des Tirs, sous SD depuis 6 ans, on a montré l'importance du maintien d'environ 50% de résidus à la surface du sol pour réduire jusqu'à 70% du taux de ruissellement et plus de 50% des pertes en terres par rapport au semis conventionnel (SC).

Ce travail a montré que la teneur en eau était souvent supérieure sinon égale sous SD par rapport au SC. Ceci a été expliqué par une meilleure stabilité des agrégats ainsi que la présence du mulch favorisant une meilleure rétention d'eau du sol sous SD par rapport au SC. En plus, le suivi du potentiel matriciel du sol durant le cycle de croissance du blé, a démontré que la présence de 50% mulch en surface a permis aux traitements sous SD de se dessécher tardivement (3 semaines) après le dessèchement d'un sol sous SC.

Par ailleurs, cette recherche a permis de rapporter que l'adoption du SD est capable de renverser l'appauvrissement des sols en matières organiques (MO) et que le degré de cet enrichissement en MO dépend de la texture des sols. Une augmentation de 10 % du stock de la MO, dans SD par rapport au SC dans les Vertisols.

Quant à l'analyse de la qualité chimique de cette MO, on a montré que les Tirs non labourés ont significativement plus de substances humiques de formes stables (acides humiques et humine) que de formes instables (acides fulviques), contrairement au Tirs labourés.

Ce travail de recherche nous a permis de confirmer, par des mesures in situ et à différentes saisons, que l'émission de CO₂ du sol vers l'atmosphère est significativement plus faible sous SD que sous SC dans les Tirs Méditerranéens.

Sachant que n'importe quel système de gestion des sols ne peut être adopté par les agriculteurs s'il n'améliore pas la production, une grande partie de cette recherche a été consacrée au suivi des rendements de cultures (blé et lentille) sous SD et SC. Suite à l'analyse de 7 années de mesures, on a pu conclure que le système SD permet un rendement de la culture du blé meilleur sinon égal par rapport au SC. Par contre, la culture de la lentille a été plus vulnérable à l'excès de pluie lors des années pluvieuses sous SD comparativement au SC. Ceci a remis en cause le choix de cette culture comme rotation avec le blé durant les années humides sur les Vertisols non labourés.

Finalement, on peut conclure que le SD, avec une bonne gestion des résidus de cultures, constitue une solution sérieuse pour réduire la vulnérabilité des filières céréalières aux variations climatiques qui marque la zone d'étude et pour produire de manière durable sur les Vertisols sous climat méditerranéen contrasté.