

Effet à moyen et à long terme du semis direct sur la matière organique, la stabilité structurale et la compaction des sols argileux au Maroc

M. LAGHROUR^{1,2}, R. MOUSSADEK², R. MRABET², M. MEKKAOUTI¹

(Reçu le 13/12/2018; Accepté le 06/03/2018)

Résumé

Au Maroc, les effets des changements climatiques couplés à la dégradation des ressources en sol constituent des facteurs majeurs limitant le développement socio-économique. Parmi ces facteurs, le labour intensif pratiqué par les agriculteurs marocains provoquent l'appauvrissement des sols en matière organique (MO) et affectent leurs propriétés physiques (stabilité structurale, densité apparente) ce qui favorise leur érosion. L'objectif de ce papier est d'évaluer dans quelle mesure le semis direct (SD), peut être utilisé pour remédier à ces divers défis précités. La méthodologie adoptée consiste à suivre les teneurs en MO à différentes profondeurs dans deux sites sur des sols du Maroc Central ayant des conduites contrastées de labour sur le moyen et le long terme: semis direct (SD) et semis conventionnel (SC). En complément, nous avons étudié l'effet du SD sur deux propriétés physiques du sol à savoir: la stabilité structurale et la densité apparente (Da). Les résultats obtenus ont montré les effets favorables du système du SD sur ces propriétés du sol. Des différences entre les deux traitements ont été enregistrées, d'une part, à la surface du sol après 10 et 11 ans d'essai (premier site) et d'autre part, en profondeur après 32 ans d'essai (deuxième site). Ces différences ont été significatives (P-value <0,05) pour tous les paramètres à l'exception de la Da. On en conclut que le SD a amélioré la qualité du sol sur le moyen et le long terme, ce qui contribue à réduire sa vulnérabilité à l'érosion.

Mots Clés: semis direct, matière organique, stabilité structurale, densité apparente, Maroc Central

Medium and long-term effect of direct sowing on organic matter, structural stability and compaction of clay soils in Morocco

Abstract

In Morocco, the effects of climate change coupled with the degradation of soil resources are major factors limiting socio-economic development. Among these factors, intensive plowing practiced by Moroccan farmers causes depletion of soil organic matter (OM) and affect their physical properties (structural stability, apparent density) which promotes their erosion. The purpose of this paper is to assess the extent to which no-till (SD) can be used to address these various challenges. The adopted methodology consists of monitoring the OM contents at different depths in two sites on soils of Central Morocco with mixed plowing practices in the medium and long term: direct seeding (SD) and conventional seeding (SC). In addition, we studied the effect of SD on two physical properties of the soil: structural stability and apparent density (Da). The results obtained showed the favorable effects of the EA system on these soil properties. Differences between the two treatments were recorded on the one hand on the soil surface after 10 and 11 years of testing (first site) and on the other hand, at depth after 32 years of testing (second site). These differences were significant (P-value <0.05) for all parameters except Da. It is concluded that EA has improved soil quality over the medium and long term, which contributes to reducing its vulnerability to erosion.

Keywords: direct sowing, organic matter, structural stability, apparent density, Central Morocco

INTRODUCTION

La matière organique (MO) du sol joue un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Grâce à ses multiples fonctions, particulièrement son pouvoir de résistance à l'érosion, la MO est considérée comme une composante principale déterminante de la qualité du sol (Balesdent *et al.*, 2000; Chenu *et al.*, 2000; Pagliai *et al.*, 2004). La présence de la MO en quantité suffisante dans le sol porte des modifications considérables sur les éléments nutritifs ainsi que sur ses propriétés physiques (DU *et al.*, 2014; Andruschkewitsch *et al.* 2013; Acaret *et al.*, 2018; Bottinelli *et al.*, 2017; da Silva Oliveira *et al.*, 2017). Elle améliore la fertilité du sol, renforce la cohésion entre les particules minérales, contribue à une bonne structuration du sol et améliore l'infiltration de l'eau. Par

conséquent, elle est un facteur clé des sols, à la fois pour lutter contre les effets des aléas climatiques (sécheresse, érosion, ruissellement), et pour assurer une production alimentaire durable (Bot et Benites, 2005). Cependant, les sols marocains subissent actuellement une réduction du taux de la MO. La perte de la MO au fil du temps est d'origine essentiellement anthropique suite à l'utilisation de techniques inappropriées. Malheureusement, les agriculteurs, dans leur majorité, ignorent qu'à long terme des pratiques agricoles comme le labour profond n'intègrent pas les exigences d'une agriculture durable. À cet effet, l'adoption d'une stratégie de valorisation et de protection des sols doit s'imposer comme une préoccupation forte à l'échelle internationale. Plusieurs auteurs (Bessam et Mrabet, 2003; Mrabet, 2011; Sheehy *et al.*, 2015; Mousadek *et al.*, 2011) ont révélé l'importance de l'adoption de

¹ Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences, Rabat, Maroc

² Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Rabat, Maroc

l'agriculture de conservation et notamment le semis direct (SD) en tant qu'un remède alternatif face à cette situation alarmante. Cette technique a pour objectif d'assurer la durabilité du système de production agricole en réduisant la vulnérabilité des sols à l'érosion via l'accroissement des teneurs en MO à la surface du sol (Moussa-Machraoui *et al.*, 2010).

Cet article contribue à cet effort de recherche en mettant l'accent sur les changements qui ont affecté les propriétés physiques du sol sous deux essais conduits sous SD depuis une décennie dans le plateau des Zaërs (10 à 11 ans, moyen terme) et trois décennies dans la plaine des Abda (32 ans, long terme). On s'intéressera particulièrement à la teneur de la MO, la stabilité structurale et la densité apparente (Da).

MÉTHODES ET MATÉRIEL

Sites expérimentaux

Deux sites expérimentaux dont le sol est de type Vertisol ont été retenus pour l'étude. Le premier site expérimental est situé à la station expérimentale de l'INRA à Marchouch, situé dans le plateau de Zaërs, aux environs de Romani à 68 Km au Sud-Est de Rabat (Longitude: 06° 71' West; Latitude: 33° 60' Nord; Altitude: 339 m). L'expéri-

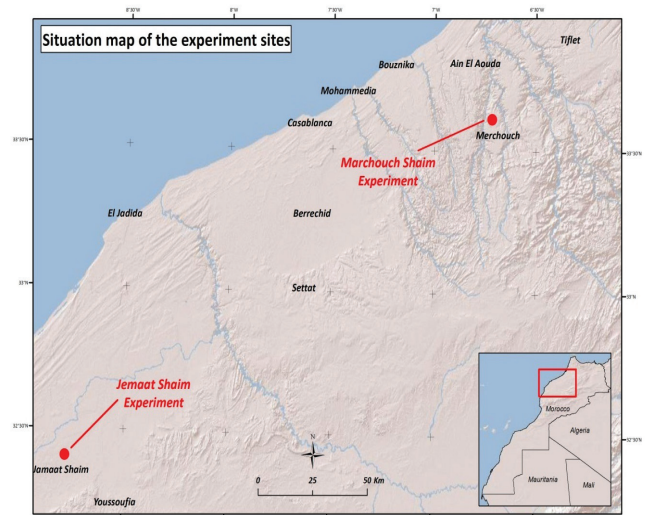


Figure 1 : localisation géographique des deux sites d'expérimentations

mentation a débuté en 2004. Le deuxième site est situé à la station expérimentale de l'INRA à Jemaat Shaim (dans la région de Safi) et l'essai a été mis en place en 1983. Les températures et les précipitations mensuelles pour l'année 2014-2015 de deux sites sont présentées dans la figure 2.

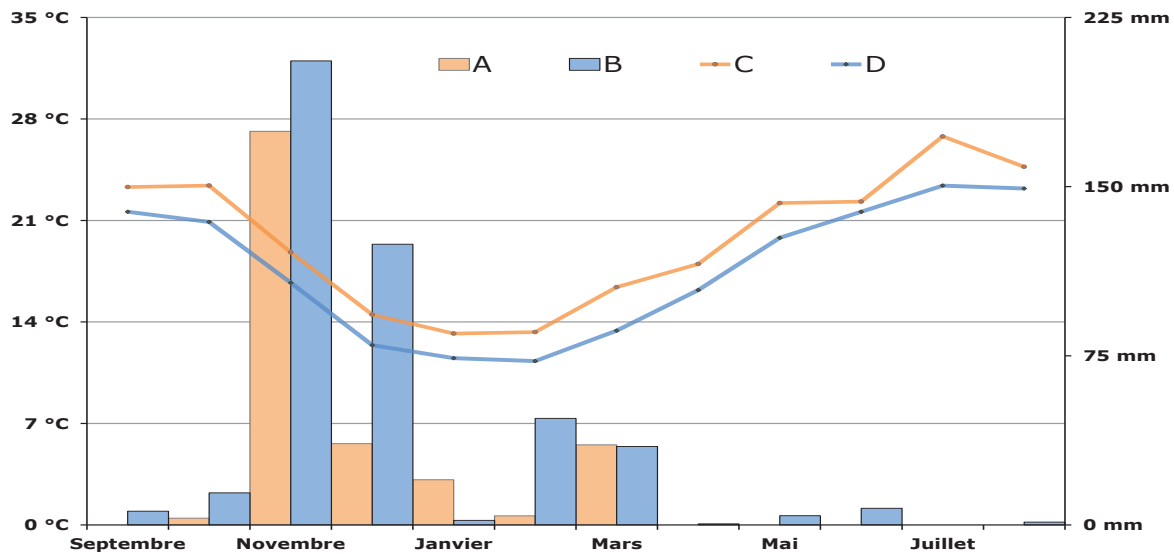


Figure 2 : Données climatiques des deux sites d'étude durant l'année 2014-2015. A et B: précipitations à Jemaat Shaim et à Marchouch respectivement; C et D: températures mensuelles à Jemaat Shaim et à Marchouch respectivement

Tableau 1: Caractéristiques granulométriques d'un profil cultural sur chacun des sites

Sites	Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sable (%)	Texture
Site de Marchouch	0-10	54,5	32,3	11,2	Argileuse
	0-20	50,0	37,3	12,7	Argileuse
	20-80	52,5	35,1	12,4	Argileuse
	80-120	53	23,1	23,9	Argileuse
Site de Jemaat Shaim	0-10	48,2	27,3	24,5	Argileuse
	10-20	42,1	21,01	36,91	Argileuse
	20-30	39,7	23,32	37,02	Argileuse/Loam argileux
	30-40	31,4	33,24	35,05	Loam argileux
	40-60	42,1	21,01	36,82	Argileuse
	60-80	42	20,21	36,84	Argileuse

Durant l'année 2014-15 il est constaté que dans la région de Jemaat Shaim la température est plus élevée et la pluviométrie plus faible que celles enregistrées dans la région du Marchouch.

D'après les analyse de la granulométrie des sols des deux sites (Tableau 1), on en déduit que les deux sols étudiés ont une texture argileuse.

Démarche méthodologique

Les parcelles des deux sites expérimentaux ont été divisées et traitées selon deux modalités distinctes liées au travail du sol: semis direct (SD) et semis conventionnel (SC). La modalité SC correspond à un travail conventionnel du sol (labour jusqu'à 30 cm de profondeur) suivi d'un travail superficiel (10 à 15 cm) par Cover-Crop dont l'objectif est la préparation des lits de semences et l'enfouissement des résidus de culture de l'année précédente. La modalité SD consiste à faire une seule opération aratoire. Cette dernière est réalisée avec un semoir spécial qui consiste à ouvrir le sol sur 2 à 3 cm et placer la semence à environ 5 cm de profondeur. Les résidus des cultures restent en surface du sol. L'essai expérimental SD a été installé depuis 1983 à Jemaat Shaim, et depuis 2004 à Marchouch. Il est à noter que l'essai de Jemaat Shaim est le plus ancien au Maroc. Les deux sites sont basés sur la rotation céréales/légumineuses, voire céréales sur jachère pour le site de Jemaat Shim.

Évaluation des propriétés du sol

Afin d'étudier l'impact du SD sur la qualité physique du sol, des échantillons ont été prélevés à la surface du sol et en profondeur en faisant des répétitions selon le paramètre à mesurer. Le tableau 2 résume les informations concernant le prélèvement des échantillons dans les deux sites étudiés.

Méthodes analytiques

Matière organique

Les échantillons prélevés ont été séchés à l'air libre, puis tamisés à 0,2 mm de diamètre. La teneur en carbone

organique a été mesurée selon la méthode de Walkley et Black (1934).

Stabilité structurale

La stabilité structurale du sol permet d'estimer la capacité d'un sol à conserver sa structure quand il est soumis à différentes contraintes. Elle est déterminée par la méthode proposée par Le Bissonnais (1996). Cette méthode combine trois tests décrivant le comportement du sol soumis à différentes conditions climatiques et hydriques que l'on peut rencontrer à la surface du sol. Ces tests sont:

- Traitement d'humectation rapide par immersion;
- Traitement d'humectation lente par capillarité;
- Traitement de désagrégation mécanique par agitation après réhumectation.

Les résultats obtenus pour chaque traitement ont été exprimés en mm sous la forme de Diamètre Moyen Pondéré (DMP) (Le Bissonnais 1996). Plus le DMP d'un sol est élevé, plus sa stabilité est grande.

Densité apparente

La mesure de la densité apparente a été effectuée à l'aide de cylindres de volume connu. Les échantillons prélevés sont pesés avant et après leur passage à l'étuve à 105 °C pendant 48 heures. La mesure de la densité apparente, exprimée en g/cm³, a été effectuée selon la méthode de Grossmanet Reinsch (2002).

Analyses statistiques des données

Dans l'objectif de déterminer l'effet de deux traitements (SD et SC) sur les propriétés physiques du sol, une comparaison des moyennes des mesures a été réalisée selon le test Student au seuil de 5%.

Tableau 2: Résumé des échantillons de sol prélevés sur chaque site

Sites	Dates des prélèvements des sols	Rotation: Céréales/ légumineuses	Paramètres mesurés									
			MO		Stabilité structurale		Da					
			H. (cm)	N. d'écha.	H. (cm)	N. d'écha.	H. (cm)	N. d'écha.				
Site de Marchouch	21 mai, 2013	Blé tendre/Lentille	0-10	24	0-10	6	0-13	6				
			0-10	6	-	-	0-10	6				
	10-20	6										
	20-40	6										
26 mai, 2015	Blé tendre/ Lentille	40-60	6	0-10	6	0-10	6					
		0-2,5	10									
Site de Jemaat Shaim	23 juin, 2015	Blé tendre/ Pois-chiche	2,5-5					10	10-20	6	10-20	6
			5-10					10				
			10-20					10				
			20-30					10	10-20	6	10-20	6
			30-40					10				
			40-60	10								
			60-80	10								
Nombre total des échantillons prélevés/paramètre			128		18		24					
Le nombre total des échantillons des sols prélevés			170									

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Étude de l'effet du travail du sol sur la teneur en matière organique des sols

Les résultats des teneurs en MO des sols étudiés sont présentés dans le tableau 3. A moyen terme, les essais sur le site de Marchouch ont montré, après 10 et 11 ans, des teneurs en MO significativement plus élevées pour le SD à la surface du sol (0-10 cm) d'essais que pour le SC. Ceci est conforme aux résultats obtenus dans des travaux précédents (Angers *et al.*, 1997; Blanco-Canqui et Lal, 2008; Moussadek *et al.*, 2011, 2014; Jemai *et al.*, 2013), qui ont conclu que le SD permet d'accroître la teneur en MO à la surface du sol contrairement à celle du SC. La raison de cette augmentation est liée à la gestion des résidus de la culture antécédente qui ne sont pas totalement prélevés sous SD et qui se décomposent à la surface du sol. Concernant la distribution des teneurs en MO dans les couches profondes, Shi *et al.*, (2012) ont constaté des teneurs similaires entre les deux traitements. Cependant, les résultats obtenus dans le site de Marchouch après 11 ans d'essais, montrent que les teneurs en MO dans les couches au-dessous de 10 cm, sont supérieures sous SD en comparaison avec le SC.

Sur le long terme, les essais sur le site de Jemaat Shaim (après 32 ans d'expérimentation) indiquent des valeurs en MO du sol statistiquement (P -value < 0,05) plus élevées pour le système du SD tout au long du profil cultural jusqu'au 40 cm de profondeur. Ceci est en concordance avec les résultats obtenus sur des sites similaires sous SD (Mrabet, 2002; Moussadek *et al.*, 2011; Nascente *et al.*, 2013). Une accumulation plus importante de la MO a été enregistrée sous SD dans la couche 5-10 cm par rapport à celle enregistrée dans les deux autres couches de la surface du sol 0-2,5 cm et 2,5-5 cm. La variation de la teneur en MO entre les deux modes du travail du sol pour les trois couches superficielles précédemment citées est respectivement de l'ordre de 54%, 47% et 44%. Cette augmentation plus forte de la MO sous SD, observée à

la profondeur 5-10 cm par rapport à 0-5 cm, peut être expliquée par la présence des fentes de retraits dans ce sol de type Vertisol (Paton, 1974; Kovda *et al.*, 1996; Moussadek *et al.*, 2017). Ceci est en concordance avec les travaux d'Obour *et al.*, (2017) qui ont trouvé après 50 ans d'essais sur un sol limoneux des teneurs en MO significativement plus élevées sous SD que sous SC pour l'horizon 0-30 cm alors qu'aucune différence significative n'était observée en-dessous de 30 cm.

En comparant les résultats obtenus à moyen et à long terme, on peut constater que l'accumulation de la MO à la surface du sol et dans les couches profondes dépend de la durée de l'adoption de système du SD. Ceci a été confirmé par Kibet *et al.*, (2016), qui ont montré que l'augmentation de la teneur en carbone organique sous SD par rapport au SC devenait significative (P -value < 0,05) dans les horizons 0-10 cm et 10-20 cm pour un essai de 33 ans de durée alors qu'elle ne l'était pas sur un essai de 9 ans.

Étude de l'effet du travail du sol sur la stabilité structurale

Le Bissonais (1996) a défini la stabilité structurale des agrégats par la capacité d'un sol à conserver son arrangement entre les particules solides et les vides quand il est exposé à des contraintes de différentes natures et de différentes intensités. L'impact de type d'engins de labour du sol, des gouttes de pluie ou l'humectation sont des exemples d'actions pouvant affecter la stabilité d'un sol. Une bonne stabilité structurale réduit la battance et par conséquent les pertes des sols par le ruissellement.

Les effets des pratiques culturales étudiées sur la stabilité structurale sont exprimés en diamètres moyens pondéraux (DMP). Les résultats de Marchouch (10 ans d'essais sous SD) sont présentés dans la figure 3 et ceux de Jemaat Shaim (32 d'essais sous SD) dans la figure 4.

À moyen terme, les résultats obtenus après 10 ans d'essais dans le site de Marchouch ont montré que les différences entre les moyennes sont statistiquement significatives (P -

Tableau 3: Effet de travail du sol sur la teneur en MO (Moyenne ± Ecart-type), (Laghrou *et al.* 2015 et 2016)

Sites	Durée du SD (Publication)	Profondeur (cm)	La matière organique du sol (g kg ⁻¹)		Taux de variation (SD-SC)/SC (%)
			SD	SC	
Site de Marchouch	10 ans	0-10	20,10 ± 1,20a*	17,60 ± 1,07b*	14
		0-10	22,23 ± 0,20a	17,13 ± 0,25b	30
	11 ans	10-20	19,11 ± 0,03a	17,38 ± 0,12a	10
		20-40	17,23 ± 0,10a	16,43 ± 0,05a	5
		40-60	15,80 ± 0,04a	15,36 ± 0,03a	3
Site de JemaatShaim	32 ans	0-2,5	19,12 ± 0,47a	13,02 ± 0,21b	47
		2,5-5	15,38 ± 0,27a	10,74 ± 0,14b	44
		5-10	15,62 ± 0,06a	10,06 ± 0,17b	54
		10-20	12,68 ± 0,06a	9,42 ± 0,10b	35
		20-30	12,48 ± 0,09a	9,58 ± 0,10b	30
		30-40	13,22 ± 0,17a	9,80 ± 0,10b	35
		40-60	11,18 ± 0,06a	9,440 ± 0,17a	19
60-80	10,20 ± 0,10a	12,94 ± 0,22a	-21		

* : les traitements n'ayant pas la même lettre sur la même ligne, sont significativement différents selon le test de Student (P -value < 0.05).

value $< 0,05$) pour deux tests sur trois (test d'humectation rapide et d'humectation lente). L'effet positif du SD sur le test d'humectation lente qui se caractérise par des pluies modérées confirme le résultat obtenu après 7 ans d'essais sur le même site (Moussadek *et al.*, 2011). Cependant, ces auteurs n'avaient pas trouvé de différence significative pour le test d'humectation rapide, ce qui renforce l'idée que l'amélioration des propriétés physiques du sol via la système SD se fait progressivement. Ainsi, après 10 ans, le sol résiste mieux sous SD que sous SC à une humectation brutale, forme la plus vulnérable à la désagrégation du sol. Cet effet positif de la stabilité structural sous semis direct pour les deux tests est probablement dû à l'accumulation des teneurs en MO à la surface du sol et à la bonne cohésion que le sol garde lorsqu'il est soumis à des pluies modérées, confirmant ainsi les résultats obtenus par certains auteurs (Annabi *et al.*, 2011; Belmekki *et al.*, 2013). Par ailleurs, l'absence d'une différence significative pour le test de désagrégation mécanique, peut être due à l'effet de l'éthanol qui sature la porosité des agrégats d'une part et d'autre part, à l'intensité de désagrégation qui dépend de l'énergie appliquée lors de retournement du sol (Annabi *et al.*, 2011). De même, elle pourrait être due à une insuffisance d'accumulation de la MO en surface (0-20 cm) (Abiven *et al.* 2009). À long terme, après 32 ans d'essais, le DMP moyen obtenu pour les trois tests de la stabilité structurale a été significativement (P -value $< 0,05$) plus élevé sous le système du SD que sous celui du SC pour les deux couches 0-10 cm et 10-20 cm de profondeur. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Kibet *et al.*, (2016) à 0-10 cm de profondeur sur des parcelles sous SD installées depuis 1981. Cependant, ces auteurs n'ont trouvé aucun effet significatif du SD à 10-20 cm de profondeur.

Le DMP moyen obtenu pour les trois tests de la stabilité structurale a été plus élevé sous le système du SD que sous celui du SC pour les deux sites étudiés. La différence de DMP moyen obtenu entre les deux modes de travail du sol a été observée aussi bien après 32 ans qu'après 11 ans d'expérimentation. L'amélioration de la stabilité structurale sous SD peut s'expliquer par une diminution des actes aratoires qui permet par la suite d'augmenter progressivement la teneur en matière organique du sol. En effet, de nombreuses études ont mis en relation une augmentation de la stabilité structurale avec l'accumulation de la teneur en MO (Six *et al.* 1999; Bissonnette *et al.*, 2001; Carter, 2002). L'accumulation de la MO à la surface du sol permet donc d'améliorer l'agrégation des particules et donc de limiter son exposition au risque d'érosion.

D'après ces résultats à moyen et à long terme, on peut conclure que le système du SD affecte positivement la stabilité structurale des sols ce qui conduit à améliorer leur structure. Par conséquent, ce système peut réduire l'érosion du sol (Lal, 1991).

Étude de l'effet du travail du sol sur la densité apparente

La densité apparente est considérée parmi les principaux indicateurs physiques de la qualité du sol. Elles renseignent sur la porosité et le tassement du sol.

Les résultats obtenus pour les mesures de la densité apparente sont présentés dans le tableau 4. Ces résultats montrent des valeurs plus élevées sous le système du SD par rapport à celles obtenues sous celui du SC après 10 et 11 ans d'expérimentation. Des constats similaires ont été trouvés par Dam *et al.* (2005) et Liu *et al.* (2014). La différence entre les moyennes n'est pas significative entre les deux traitements, contrairement aux résultats obtenus sous SD après sept ans d'essais pour le même site (Moussadek *et al.*, 2011). À long terme dans le site de Jemaat Shaim, la différence entre les deux traitements reste peu importante

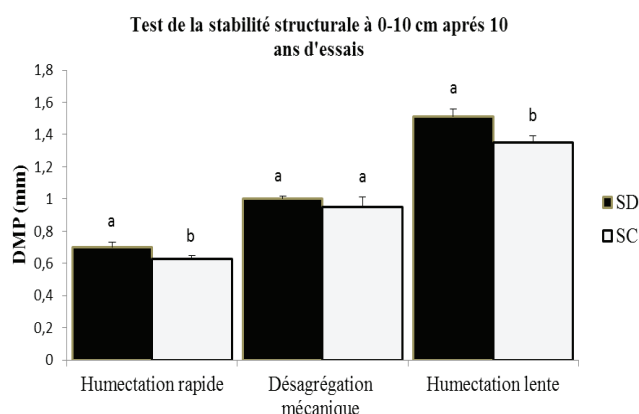


Figure 3 : Tests de la stabilité structurale exprimés en diamètres moyens pondéraux (DMP), à 0-10 cm de profondeur (Site de Marchouch), (Laghrou et al., 2015)

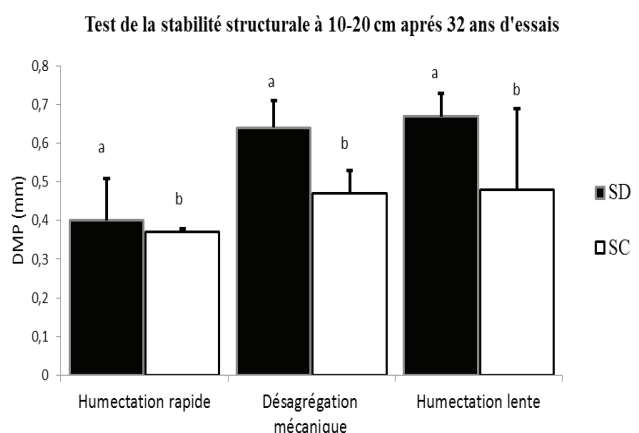
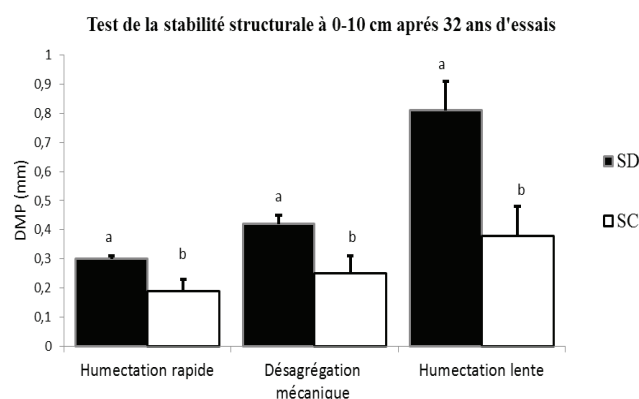


Figure 4 : Tests de la stabilité structurale exprimés en diamètres moyens pondéraux (DMP), à 0-10 et à 10-20 cm de profondeur après 32 ans d'essai (Site de Jemaat Shaim) (Laghrou et al., 2016)

Les traitements ayant des lettres différentes sont significativement différents selon le test de Student (P -value $< 0,05$). Les barres représentent l'écart-type en tenant compte trois répétitions

Tableau 4 : Effet des deux traitements (SD et SC) sur la densité apparente (Moyenne ± Ecart-type) après 10,11 et 32 ans d'essais (Laghrour et al., 2015 et 2016)

Sites	Durée de SD (ans)	Profondeur du sol (cm)	Da (g cm ⁻³)		
			SD	SC	Variation (%)
Site de Marchouch	10	0-13	1,33 ±0,12a*	1,12 ±0,10a*	18
	11	0-10	1,29 ±0,04a	1,15 ±0,14a	12
Site de Jemaat Shim	32	0-10	1,41 ±0,07a	1,37 ±0,22a	3
		10-20	1,45 ±0,05a	1,35 ±0,14a	7

T* : les traitements ayant la même lettre sur la même ligne ne sont pas significativement différents selon le test de Student (P-value < 0.05)

sur la couche 0-10 cm. Le même constat a été observé à une profondeur de 10-20 cm. En comparant les résultats obtenus sous SD après sept, dix, onze et trente-deux ans, la densité apparente des Vertisols sous SD diminue au-delà de dix ans et aucune différence significative n'est observée entre les deux systèmes. Une étude similaire sur l'effet à moyen et à long terme du SD sur la densité apparente a été faite par De Moraes *et al.* (2016). Ces derniers auteurs ont comparé la Da des Oxisols sous SD après 11 ans (SD11) et après 24 ans d'essais (SD24) à celle obtenue sous SC. Ils ont montré que la Da est significativement plus élevée sous SD que sous SC. Cependant, cette Da a été trouvée plus faible sous SD24 que sous SD11 à 0-10 cm de profondeur (Da SD11 > Da SD24 > Da SC). Pour les résultats obtenus sur la couche 10-20 cm, une plus faible Da a été observée sous SD24 que sous SC (Da SD11 > Da SC > Da SD24). Ces résultats confirment qu'il faut du temps sous SD pour que la Da puisse diminuer et que cette diminution est probablement due à l'accumulation de la MO et à l'intensification de l'activité biologique à la surface du sol.

CONCLUSION

La présente étude consiste à une synthèse des résultats obtenus sur l'étude de l'effet du semi direct (SD) sur les propriétés de deux sols argileux situés dans la région de Zaër (Marchouch) et d'Abda (Jemaat Shaim). Les résultats montrent qu'après 11 ans à Marchouch (moyen terme) et 32 ans (long terme) d'essais à Jamaat Shaim, le système sous SD favorise l'accumulation de la MO en surface du sol. Cet accroissement de la teneur en MO explique la meilleure stabilité des agrégats sous SD que sous SC (labour intensif). Sur le moyen et long terme, les résultats ont montré agrégats sous SD que sous SC (labour intensif). Les travaux ont montré l'effet bénéfique du SD sur les propriétés physiques des sols (MO, stabilité structurale et Da) et donc un effet positif pour réduire leur vulnérabilité à l'érosion hydrique.

RÉFÉRENCES

Abiven S., Menasseri S. et Chenu C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1–12.

Acar M., Celik I. et Günal H. (2018). Effects of long-term tillage systems on aggregate-associated organic carbon in the eastern Mediterranean region of Turkey. *Eurasian Journal Of Soil Science* 7: 51–58.

Andruschkewitsch R., Geisseler D., Koch H.J. et Ludwig B. (2013). Effects of tillage on contents of organic carbon, nitrogen, water-stable aggregates and light fraction for four different long-term trials. *Geoderma* 192: 368–377.

Angers D.A., Bolinder M. A. Carter M.R. Gregorich E.G. Drury C.F. Liang B.C., Voroney R. P., Simard R. R., Donald R.G. et Beyaert R.P. (1997). Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil and Tillage Research* 41: 191–201.

Annabi M., Le Bissonnais Y., Le Villio-Poitrenaud M. et Houot S. (2011). Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agriculture, ecosystems & environment* 144: 382–389.

Balesdent J., Chenu C. et Balabane M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and tillage research* 53: 215–230.

Belmekki M., Mrabet R., Moussadek R., Iben Halima O., Boughlala M. et El Gharous M. et Bencharki A. (2013). Impact des pratiques agricoles sur la stabilité structurale et la matière organique du sol dans les zones semi-arides Marocaines. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 4: 322–333.

Bessam F. et Mrabet R. (2003). Long-term changes in soil organic matter under conventional tillage and no-tillage systems in semiarid Morocco. *Soil Use and Management* 19: 139–143.

Bissonnette N., Angers D.A., Simard R.R. et Lafond J. (2001). Interactive effects of management practices on water-stable aggregation and organic matter of a Humic Gleysol. *Canadian journal of soil science* 81: 545–551.

Blanco-Canqui H. et Lal L. (2008). No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal* 72: 693–701.

Bot A. et Benites J. (2005). *The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food production*. 80. FAO.

Bottinelli N., Angers D. A., Hallaire V., Michot D., Le Guillou C., Cluzeau D., Heddadj D. et Menasseri-Aubry S. (2017). Tillage and fertilization practices affect soil aggregate stability in a Humic Cambisol of Northwest France. *Soil and Tillage Research* 170: 14–17.

Carter M. R. (2002). Soil quality for sustainable land management. *Agronomy journal* 94: 38–47.

Chenu C., Le Bissonnais Y., et Arrouays D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. of Amer. J.* 64: 1479–1486.

- D. Silva Oliveira M.D., de Lima R. P., Barreto M.S.C., Verburg E.E.J., et Mayrink G.C.V. (2017). Soil organic matter and nutrient accumulation in areas under intensive management and swine manure application. *Journal of Soils and Sediments* 17: 1–10.
- Dam R. F., Mehdi B. B., Burgess M. S. E., Madramootoo C. A., Mehuys G. R., et Callum I. R. (2005). Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil and Tillage Research* 84: 41–53.
- De Moraes, M.T., Debiassi H., Carlesso R., Franchini J.C., da Silva V.R., et Da Luz F.B. (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research* 155: 351–362.
- Du X.b., Chen C., Luo L.J., Xia L.P., Kang L. I. U., Chen Y.H. et Yu X.G. (2014). Long-term no-tillage direct seeding mode for water-saving and drought-resistance rice production in rice-rapeseed rotation System. *Rice Science* 21: 210–216.
- Grossman R. B. et Reinsch T. G. (2002). 2.1 Bulk density and linear extensibility. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, Methods of soil analysis 4: 201–228.
- Kibet L.C., Blanco-Canqui H., Jasa P. (2016). Long-term tillage impacts on soil organic matter components and related properties on a Typic Argiudoll. *Soil and Tillage Research* 155 (janvier): 7884.
- Kovda I., Morgun E. et Tessier D. (1996). Etude de Vertisols a gilgai du Nord-Caucase: mecanismes de differenciation et aspects pedogeochemiques. *Etude et gestion des sols* 3: 41–52.
- Laghrou M., Moussadek R., Mekkaoui M., Zouahri A., Dahan R. & El Mourid M., (2015). Impact du semis direct sur les propriétés physiques d'un sol argileux au Maroc Central (Impact of No Tillage on physical proprieties of a clay soil in Central Morocco)». *J. Mater. Environ. Sci.* 6: 391-396.
- Laghrou M., Moussadek R., Mrabet R., Dahan R., El-Mourid M., Zouahri A., & Mekkaoui, M., (2016). Long and midterm effect of conservation agriculture on soil properties in dry areas of Morocco. *Applied and Environmental Soil Science*. Volume 2016, Article ID 6345765, 9 pages.
- Lal R. (1991). Soil structure and sustainability. *Journal of Sustainable Agriculture* 1: 67–92.
- Le Bissonnais Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of soil science* 47: 425–437.
- Liu E., Teclmariam S.G., Yan C., Yu J., Gu R., Liu S., He W. et Liu Q. (2014). Long-term effects of no-tillage management practice on soil organic carbon and its fractions in the northern China. *Geoderma* 213: 379–384.
- Moussadek R., Laghrou M., Mrabet R., Ranst E.V., Badraoui M. et Mekkaoui M. (2017). Morocco's Vertisol Characterization (Tirs). *Journal of Materials and Environmental Science* 8: 3932–3942.
- Moussadek R., Mrabet R., Dahan R., Zouahri, M. El Mourid et E. Van Ranst. (2014). Tillage system affects soil organic carbon storage and quality in Central Morocco. *Applied and Environmental Soil Science* 2014.
- Moussadek R., Mrabet R., Zante P., Lamachere J.M., Pepin Y., Le Bissonnais Y., Ye L., Verdoodt A. et Ranst E.V., (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: 627–635.
- Moussa-Machraoui S. B., Errouissi F., Ben-Hammouda M. et Noura S. (2010). Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. *Soil and Tillage Research* 106: 247–253.
- Mrabet R. (2002). Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. *Soil and Tillage Research* 66: 119–128.
- Nascente A., Yuncong S., Li C. et Crusciol C.A.C. (2013). Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter. *Soil and Tillage Research* 130: 52–57.
- Obour A.K., Mikha M.M., Holman J.D., et Stahlman P.W. (2017). Changes in soil surface chemistry after fifty years of tillage and nitrogen fertilization. *Geoderma* 308 (décembre): 4653.
- Pagliai M., Vignozzi N., et Pellegrini S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research* 79: 131–143.
- Paton T. R. (1974). Origin and terminology for gilgai in Australia. *Geoderma* 11: 221–242.
- Sheehy J., Regina K., Alakukku L. et Six J. (2015). Impact of no-till and reduced tillage on aggregation and aggregate-associated carbon in Northern European agroecosystems. *Soil and Tillage Research* 150: 107–113.
- Shi X.H., Yang X.M., Drury C.F., Reynolds W.D., McLaughlin N.B. et Zhang X. P. (2012). Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in southwestern Ontario. *Soil and Tillage Research* 120: 1–7.
- Six J., Elliott E.T. et Paustian K. (1999). Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1350–1358.
- Walkley A. et Black L.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science* 37: 29–38.