

ESTIMATION DE LA STABILITE STRUCTURALE DES SOLS SEMI-ARIDES MAROCAINS. INFLUENCE DES TECHNIQUES CULTURALES SIMPLIFIEES

Rachid Mrabet*, Sabah Lahlou*, Yves Le Bissonnais et Odile Duval****

* Laboratoire de Physique du sol, Centre Aridoculture, INRA, BP 589 Settat 26000 Maroc
Fax: +21223720927; email: mrabet_rachid@hotmail.com

** Unité Science du sol, INRA Centre de recherche d'Orléans, Avenue de la Pomme de Pin,
BP 20619 Ardon, 45166 Olivet cedex, France
email: Yves.Le-Bissonnais@orleans.inra.fr

Résumé

La dégradation des sols semi-arides marocains et la possibilité d'y remédier peuvent être évaluées en utilisant des tests de stabilité structurale. Cette dégradation, qui a eu pour conséquence un déclin de la production, est due à la fragilité du sol mais aussi à des systèmes de production mal adaptés. Cette étude préliminaire a un double objectif : quantifier la stabilité structurale d'un certain nombre de sols et confronter ces estimations aux mesures effectuées in situ dans deux sites de recherche sur les techniques culturales simplifiées installés depuis 1987 et 1994. Les mesures de la stabilité structurale ont été effectuées sur des échantillons prélevés dans des horizons de surface. 47 sols différents ont été choisis pour couvrir une large gamme de granulométrie et de caractères physico-chimiques. Le test de stabilité structurale de Kemper et Rosenau a été utilisé dans cette étude. Une corrélation positive a été trouvée entre le taux de matière organique et la stabilité structurale. En outre, plus le taux d'argile augmente, plus la stabilité de la structure s'améliore. Toutefois, les mesures de stabilité effectuées ont montré que seulement 32% des sols présentent un taux d'agrégats stables à l'eau supérieur à 50%. En conséquence, plus des 2/3 des sols marocains étudiés sont sujets aux processus de dégradation, particulièrement à l'érosion, au ruissellement et à la battance. La fraction 1-2 mm des agrégats utilisée dans la méthode de Kemper et Rosenau limite l'interprétation des différences de stabilité structurale entre les différents sols. En confrontant ces données aux mesures effectuées sur les sites expérimentaux, il s'avère que le système de semis direct améliore la stabilité structurale, de même que l'apport de matières organiques (de fumier) en conditions de labour conventionnel ou de résidus de récolte en semis direct. En d'autres termes, cette méthode est plus intéressante pour comparer des pratiques culturales au niveau d'un même sol mais reste mal adaptée pour comparer des sols différents. Ainsi, d'autres méthodes d'estimation de la stabilité structurale doivent être expérimentées sur les sols marocains généralement calcaires. La méthode de mesure de la stabilité structurale doit en particulier permettre de classer les sols selon leur sensibilité à l'érosion, à la battance et à la prise en masse.

Mots Clés : Stabilité structurale, semis direct, qualité du sol, érosion, dégradation, battance, Maroc.

Abstract

Soil degradation, with its various facets, is a serious problem threatening agricultural and rural development in Morocco. Declining productivity is a pronounced dilemma in the country. These dilemmas can be ascribed to fragility of soils but also to inappropriate production systems. Structural stability can be a key measure to differentiate among soils and their uses. Aggregation can also be an indicator for the ability of the soil to return to a dynamic equilibrium after physical disturbance due to tillage or biological perturbation due to intensive cropping or grazing. This study has two specific objectives: estimate structural stability of a range of soils and compare

various tillage and cropping systems in their influence on structural stability of a clay soil dominant in semiarid Morocco. Only 32% of sampled soils have a percentage of waterstable aggregates higher than 50%. This helped to conclude that soils in semiarid Morocco are sensitive to degradation processes, especially erosion, runoff and crusting. In addition, it was found that structural stability relates positively to soil contents of organic carbon and clay. The direct seeding technology and use of farm manure helped to increase the structural stability of soils. However, the Kemper and Rosenau method used here to measure structural stability, is limited because of utilizing the 1 to 2 mm fraction for all soils. It is an interesting method when comparing cropping practices for the same soil, but not across soils. Hence, further studies should be initiated in comparing other pertinent methods of aggregation assessment, in order to classify soil's sensitivity to degradation.

Key Words: Structural stability, direct seeding, soil quality, degradation, crusting, Morocco

Introduction

La rareté des pluies et sa répartition aléatoire qu'a connu le Maroc durant ces vingt dernières années ont posé un grand défi à l'agriculture pluviale en général et à la céréaliculture en particulier. En plus d'être caractérisées par un climat aléatoire, les zones semi-arides marocaines sont distinguées par une mauvaise qualité des sols. Le développement de l'agriculture a soumis les terres agricoles à un régime d'exploitation intense. Ceci a engendré une dégradation de la qualité des sols, en particulier à cause d'une diminution des teneurs en matière organique par érosion et oxydation. La faible productivité des sols est le résultat d'une inadéquation entre l'utilisation des terres et leurs potentialités. En fait, la dégradation du sol à cause du surpâturage et des labours compromet l'espoir de fixer de façon durable une agriculture performante et rentable au Maroc. Ainsi, on assiste à une maîtrise insuffisante de l'érosion, une désagrégation du sol et une déperdition de son stock en matières organiques. En d'autres termes, les mesures préconisées ont un caractère conjoncturel, ce qui conduit à la dégradation continue des ressources naturelles et à la domination d'un système agricole de plus en plus précaire et fragile. Pour faire face à des insuffisances techniques, économiques et foncières, l'agriculteur marocain s'oriente vers une exploitation maximum du disponible végétal.

Par conséquent, un nouveau mode de gestion des terres pour une restauration ou préservation du sol doit être instauré. En effet, pour remédier simultanément à la dégradation de la qualité du sol et au déclin des productions, les techniques de semis direct, qui visent une réduction du travail du sol, sont appliquées dans la plupart des pays des cinq continents (Steiner, 1998 ; Derpsch, 2001). Outre les avantages sur le plan économique, de temps de travail, en énergie, les techniques de semis direct sont une nouvelle démarche agronomique qui vise à développer voire restaurer le sol vers une fertilité naturelle. Cette amélioration de la fertilité du sol s'appuie sur une re-dynamisation organique et biologique des sols et une re-structuration de sa partie superficielle qui au lieu d'être sensible à la dégradation deviendra un support pour une agriculture durable. Cet article insiste sur la détermination des relations entre la stabilité structurale et les propriétés du sol d'une part et les techniques culturales d'autre part. Ainsi, 47 sols ont été échantillonnés pour être caractérisés du point de vue de leur texture, de leur teneur en matière organique et en calcaire et de leur stabilité structurale.

Cette étude a pour objectif une meilleure connaissance des propriétés structurales des sols marocains. Afin de déterminer l'impact des systèmes de labour et de la gestion des cultures et de leurs résidus sur la stabilité de la structure du sol, différentes mesures ont été réalisées pour déterminer le taux d'agrégats stables à l'eau sous différentes rotations culturales et pratiques agricoles intensifiées et conservatrices (semis direct). Les mesures ont concerné deux sites d'expérimentation de longue durée appartenant à l'Institut National de la Recherche Agronomique de Settat, Maroc.

Effet des propriétés du sol sur la stabilité structurale

La structure du sol est le résultat de l'arrangement spatial des particules minérales et leur éventuelle liaison par la matière organique, les hydroxydes de fer et/ou d'aluminium à un instant donné. La stabilité structurale est la solidité de cet état, sa résistance vis-à-vis de l'action dégradante des facteurs externes, en particulier l'action de l'eau. On appelle stabilité structurale, la résistance opposée par les agrégats à toute action tendant à les dégrader ou à les détruire. La stabilité structurale joue un rôle important dans la fertilité des sols car elle influence ses propriétés physiques (aération, circulation de l'eau, perméabilité, érodibilité), chimiques (échanges ioniques, séquestration du carbone) et biologiques (activités des microorganismes, croissance racinaire).

La formation d'agrégats est un processus combiné des facteurs biotiques (racines, faune, microbes, champignons) et abiotiques (taille et valence des cations, texture, minéralogie des argiles). La stabilité de la structure est considérée comme un bon indicateur de la qualité des sols et de leur sensibilité au ruissellement et à l'érosion (Barthès et Roose, 2001). Elle intègre la vision du biologiste, du chimiste, du microbiologiste et du physicien du sol dans l'amélioration du sol (Ternan et al., 1996).

Certains facteurs favorisent la structure du sol, d'autres la régénèrent. Un travail du sol excessif diminue la stabilité de la structure, de même qu'une hydratation trop brutale des agrégats, suivie d'une dessiccation rapide. Certains éléments interviennent sur la stabilité structurale et ont des interactions positives comme par exemple le calcium, l'humus et le fer (Oades, 1984 ; Amézketa, 1999). La destruction de la structure ou la désagrégation se produisent par une perte de porosité, de perméabilité, par une prise en masse, un état de dispersion, et par la formation d'une croûte de battance à la surface du sol. On peut évaluer la stabilité structurale des sols soit par des méthodes de mesures directes, soit par des méthodes indirectes telles que la mesure de la porosité ou celle de la perméabilité. Pour les méthodes directes, plusieurs auteurs ont proposé des procédés opératoires qui permettent de recueillir des agrégats aussi intacts que possible et de mesurer, après qu'ils aient subi ou non des traitements divers, leur cohésion ou toute autre propriété pouvant être considérée comme représentative de la stabilité structurale (Amézketa et al., 1996 ; Le Bissonnais, 1996).

Il a été démontré que l'apport de matière organique et la teneur en argile sont favorables à une bonne stabilité structurale des sols. Une étude a été conduite pour établir une relation entre la stabilité structurale et les propriétés du sol sur des échantillons prélevés dans l'horizon de surface (0-10 cm) de 47 sites marocains. Le tableau 1 donne les statistiques sur les propriétés mesurées et la variation de la stabilité structurale dans cet ensemble d'échantillons. Ces propriétés (faciles d'accès) ont été mesurées par la méthode de Walkley et Black pour le carbone organique, la méthode d'hydromètre après décarbonatation pour les fractions granulométriques, et la méthode du calcimètre de Bernard pour le calcaire total. D'après ce tableau, les échantillons comprennent une large gamme de texture et de matière organique.

Il existe au niveau international plusieurs méthodes de mesure de la stabilité structurale du sol (Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Dans cette étude, la stabilité structurale par le test à l'eau a été mesurée à l'aide de la méthode de Kemper et Rosenau (1986). Quatre grammes de la fraction (1-2 mm) obtenus après tamisage à sec sont déposés dans un tamis (70 microns) animé d'un mouvement alternatif et plongé dans un gobelet contenant 100 ml d'eau distillée pendant 3 minutes. Les agrégats instables à l'eau se trouvent en suspension dans le gobelet, leur masse est pesée après séchage à l'étuve pendant 24 heures. La masse pesée correspond à la masse des agrégats instables à l'eau. Le tamis contenant les agrégats restants, les débris de végétaux et les particules de sable est animé à nouveau d'un mouvement alternatif vertical dans un gobelet contenant 100 ml d'une solution d'hexametaphosphate de sodium (2g/l) jusqu'à dispersion complète (30 minutes environ). Les particules en suspension dans la solution correspondent aux

agrégats stables à l'eau et leur masse est déterminée après passage à l'étuve pendant 24 heures à 105°C. Le taux d'agrégats stables à l'eau est donné par le rapport entre la masse des agrégats stables et la somme des deux types d'agrégats (stables et instables) multiplié par 100.

Tableau 1. Statistiques générales des différentes propriétés physico-chimiques et de la stabilité des agrégats des 47 échantillons de sols étudiés

	Calcaire total	Carbone organique	Argile	Limon	Sable fin	Sable grossier	Sable total	Taux d'agrégats stables
g / 100 g								
Moyenne	1.17	0.70	34.6	25.6	26.8	13.4	39.8	41
Maximum	18.9	1.91	66.1	39.5	55.1	31.0	78.3	95
Minimum	0	0.09	13.0	8.1	2.4	0.6	3.8	7
Ecart-type	2.7	0.9	12.4	8.5	12.1	9.7	19.7	20

D'après le tableau ci-dessus, les sols échantillonnés présentent généralement une faible cohésion. En effet, seulement 32% des échantillons présentent un taux d'agrégats stables à l'eau supérieur à 50%. Ceci est expliqué par le faible taux de matière organique de ces sols. Le tableau 2 résume les relations (qui sont toutes significatives) entre les propriétés du sol et le taux d'agrégats stables. En effet, la stabilité structurale à l'aide du test à l'eau, déterminée par la méthode de Kemper et Rosenau (1986), est positivement corrélée avec le pourcentage d'argile (Figure 1) et de matière organique (Figure 2). Ainsi, l'apport de matière organique devrait permettre une amélioration de la stabilité. En effet, elle protège les agrégats contre l'éclatement au moment de l'humectation. Toutefois, la stabilité structurale a été trouvée négativement corrélée avec la fraction sableuse. Dans la plaine de Chélif en Algérie, Saidi et al. (1999) ont aussi trouvé une corrélation significative et positive entre la stabilité structurale et le taux de matière organique. Par contre, ils n'ont pas trouvé de signification dans les corrélations entre le taux d'agrégats stables et les fractions granulométriques ou la teneur en calcaire.

Tableau 2. Relations entre constituants du sol et taux d'agrégats stables à l'eau (I_s en %)

Relation	Coefficient de corrélation r
$I_s = -22.93 + 1.856 * \text{Argile}$	0.87
$I_s = 0.088 + 0.461 * \text{Carbone Organique}$	0.79
$I_s = -3.9 + 1.77 * \text{Limon}$	0.60
$I_s = 37.5 + 3.3 * \text{Calcaire}$	0.47
$I_s = 80.8 - 1.51 * \text{Sable fin}$	-0.71
$I_s = 6.4 - 1.97 * \text{Sable grossier}$	-0.74
$I_s = 83.7 - 1.07 * \text{Sable}$	-0.80

Toutes les corrélations sont significatives à 5%.

Effet des techniques culturales sur la stabilité structurale, test à l'eau

L'échantillonnage du sol pour la mesure de la stabilité structurale a été fait sur des essais de longue durée datant de 1987 et 1994, situés dans la région de la Chaouia (ouest marocain). Au niveau du site de 1987, on compare le semis direct avec couverture végétale morte à un travail du sol classique au pulvérisateur à disques. Au niveau du site de 1994, on compare trois niveaux de résidus sous semis direct au travail du sol classique. Dans les deux sites, le sol est argileux gonflant (calcimagnésique vertique) et le climat est semi-aride à hiver humide et froid et été sec et chaud (la moyenne des précipitations est de 350 mm). Les prélèvements ont concerné les horizons 0-25, 25-70 et 70-200 mm pour l'étude des effets du systèmes de travail du sol et de la gestion des

résidus. Pour l'étude de la variabilité saisonnière, l'horizon de surface 0-50 mm a été échantillonné. La méthode de Kemper et Rosenau (1986) décrite dans les paragraphes précédents a été utilisée.

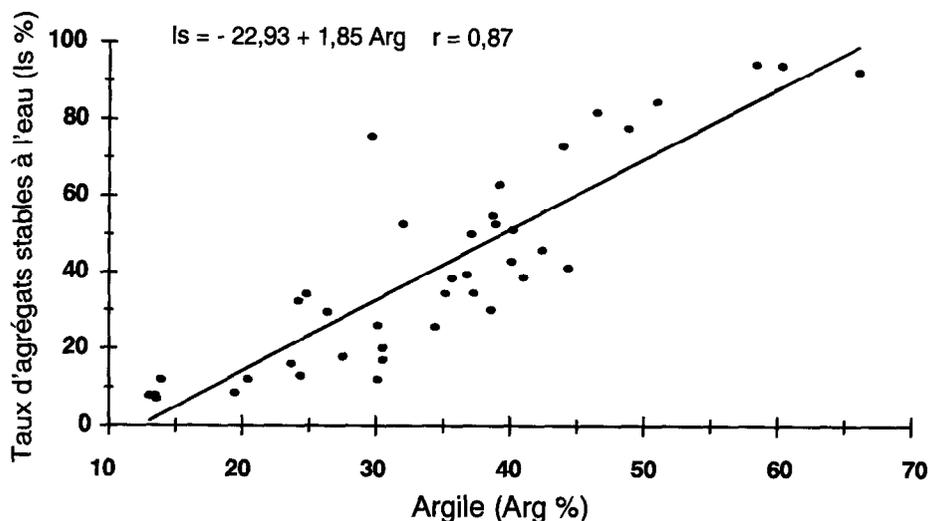


Figure 1. Relation entre la teneur en argile et la stabilité structurale du sol (0-10 cm).

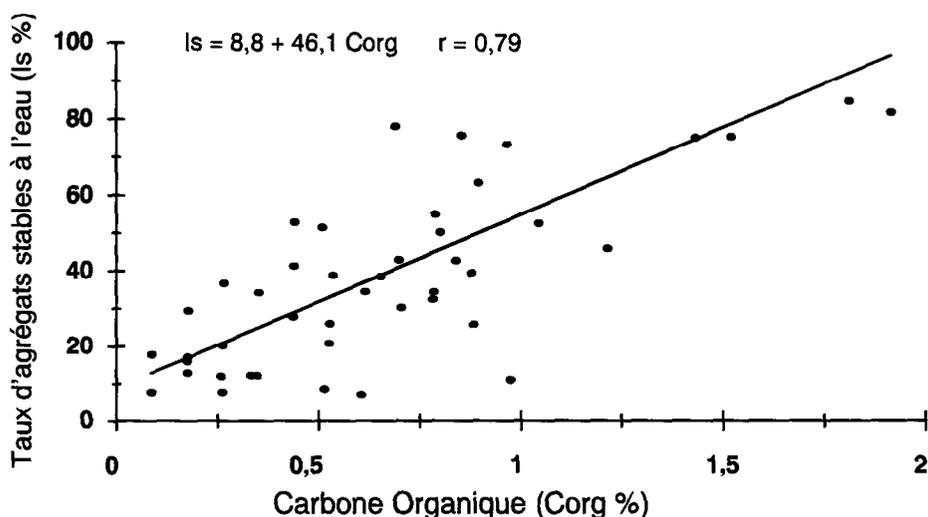


Figure 2. Relation entre la teneur en carbone organique et la stabilité structurale (0-10 cm) du sol.

Effet du système de travail du sol sur la stabilité structurale

Un des objectifs principaux du travail du sol avant semis est l'amélioration de l'état structural du sol. Cependant, si les travaux du sol sont effectués dans de mauvaises conditions (trop sèches ou trop humides), les effets obtenus sont contraires à ceux attendus : apparition d'une semelle de labour, sol émiétté en surface, etc. De plus, en agriculture motorisée, des passages répétés du tracteur favorisent le tassement du sol. Dans ces conditions, pratiquer le semis direct permet de limiter les interventions qui participent à la dégradation de la structure du sol. Cela suppose aussi d'améliorer la structure du sol d'une autre manière que par le labour : c'est l'un des rôles du mulch. Il y a une restauration progressive du sol.

La dégradation physique du sol est ressentie au niveau de l'analyse et de l'évaluation des paramètres physiques du sol, tout particulièrement la stabilité des agrégats, qui est indicatrice des effets des systèmes de gestion sur la structure du sol.

Une bonne stabilité structurale réduit la battance et donc les pertes par ruissellement. Dans l'expérimentation installée en 1987, le sol sous semis direct montre une amélioration de la stabilité structurale à l'eau en comparaison avec le labour conventionnel au pulvérisateur à disques dans les trois couches, et ceci après une période de 11 ans (Mrabet et al., 2001; Saber et Mrabet, 2002). Cette amélioration est due à une augmentation de 13,6 % de la matière organique sous semis direct alors que sous le labour conventionnel, la séquestration du carbone était négligeable (Tableau 3, Mrabet et al., 2001). Monnier et al. (1976) ont trouvé qu'entre 1970 et 1974 sur un sol limono-argileux, la stabilité structurale a augmenté considérablement surtout à la surface du sol dans le cas du semis direct. Dans les Rougiers de Camarès (sud de France), Barthès et al. (1998, 1999) ont trouvé une corrélation significative positive entre la macroagrégation et la teneur en matière organique de la couche 0-10 cm d'un sol limono-argilo-sableux. Ces mêmes auteurs ont conclu que, même à très court terme, ce sol sous semis direct présente les plus faibles taux de ruissellement et de charge solide que sous labour profond classique à la charrue à socs. Cette amélioration du régime hydrique sous semis direct est expliquée en grande partie par une augmentation de l'indice de macroagrégation stable et du niveau de matière organique.

Tableau 3. Effet du travail du sol sur le taux d'agrégats stables à l'eau (Is %) après 11 années d'expérimentation (Mrabet et al., 2001). Essai installé en 1987.

Système de travail du sol	Profondeur de mesure en mm		
	0-25 mm	25-70 mm	70-200 mm
Semis direct	59	54	51
Labour conventionnel	58	48	44
Moyenne Is	59	51	48

Effet du semis direct et de la gestion des résidus de récolte

Grâce à la fourniture au sol de résidus organiques qui favorisent l'activité microbienne et la minéralisation, les couches mortes sous semis direct participent à la restitution de la fertilité du sol. Une étude entreprise par Lahlou (1999) dans l'expérimentation initiée en 1994 a pu montrer que l'apport de résidus de récoltes en conditions de non-labour améliore la stabilité structurale d'un sol calcimagnésique vertique après seulement quatre années (Tableau 4), ce résultat ne peut que renforcer les données acquises par Kacemi (1992) sur le site installé en 1987. En plus, il est intéressant de signaler que la parcelle non-labourée non couverte de litière et semée directement a présenté en surface une stabilité structurale supérieure à celle de la parcelle travaillée. La parcelle non-labourée avec couverture totale présente des taux d'agrégats stables élevés, supérieurs aux autres parcelles dans les deux horizons (0-25 et 25-70 mm). L'état de la matière organique et l'activité biologique sont les pivots de l'amélioration de la structure du sol sous semis direct avec couverture de résidus. Ce système présente un taux de matière organique toujours élevé (Bessam et Mrabet, 2001).

Tableau 4. Influence du travail du sol et de la gestion des résidus sur le pourcentage d'agrégats (1-2 mm) stables à l'eau de trois horizons après 4 ans d'expérimentation (Lahlou, 1999). Essai installé en 1994.

Travail du sol	Profondeur de mesure en mm		
	0-25 mm	25-70 mm	70-200 mm
Pulvériseur à disques	48	45	44
Non-labour : NL ₀ *	52	40	42
NL ₁	56	47	46
NL ₂	65	51	45
Non-Labour Moyenne	58	46	44
Moyenne Générale	56	46	44

* NL₀ : Sans résidus, sol nu; NL₁ : 50% de la surface couverte de résidus ou une couverture d'une tonne de paille; NL₂ : 100% de la surface couverte de résidus ou une couverture de 6 tonnes de paille.

Effet de la rotation sur la stabilité structurale

La stabilité de la structure est influencée par le système de culture (Kacemi et al., 1995). En effet, le blé continu confère au sol une stabilité structurale plus élevée que la rotation triennale, cette dernière reste intermédiaire par rapport à la rotation biennale blé-jachère nue (Figure 3, Saber et Mrabet, 2002). Dans la couche intermédiaire, les valeurs de stabilité trouvées au niveau des rotations blé continu et blé-fourrage-jachère sont comparables et plus élevées que celles des autres rotations. Les rotations blé sur blé, blé-jachère et blé-lentilles-jachère ont favorisé la stabilité structurale, même en profondeur. De ceci, on peut conclure que le choix du système de culture est déterminant dans la genèse de la structure du sol. Plus le système est intensifié, plus le sol a une bonne stabilité structurale. Cependant, dans le milieu semi-aride marocain, la jachère devient de plus en plus nécessaire pour réussir une production stable du blé (Bouzza, 1990; Mrabet, 2000). Ainsi, il faut obligatoirement choisir un système de culture qui intègre la jachère. Cette jachère doit être chimique non travaillée pour bénéficier au maximum de la fonction productrice et conservatrice du sol (El-Brahli et al., 1997 ; Mrabet, 2001).

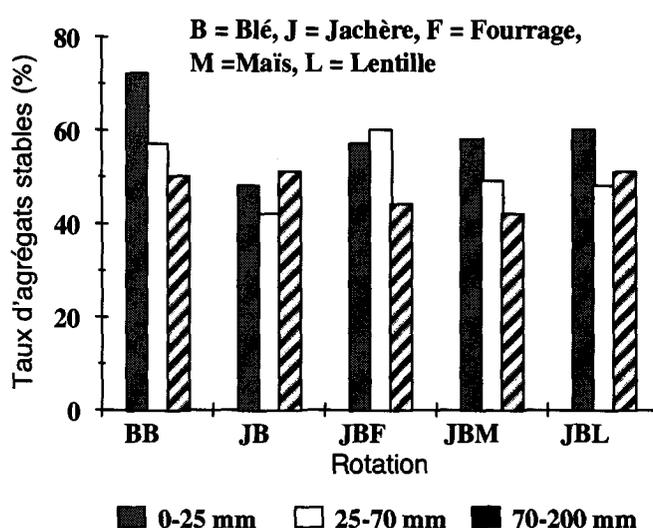


Figure 3. Effet de la rotation sur le taux d'agrégats stables à l'eau des couches supérieures du sol après 11 années (Mrabet et al., 2001 ; Saber et Mrabet, 2002)

Variation saisonnière de la stabilité structurale sous système de travail du sol

La stabilité de la structure varie dans le temps. Le sol a une bonne stabilité structurale quand sa structure résiste à des contraintes externes (Rasiah et al., 1992). La stabilité du sol varie également avec la teneur en eau. Un système de gestion optimum de la terre devrait permettre de garder une stabilité structurale élevée indépendamment de la variation d'humidité du sol (Perfect et al., 1990).

Avec le temps, la surface d'un sol en semis direct se transforme en tapis vivant qui reste praticable même en conditions défavorables. En effet, cette surface non perturbée par les outils de labour garde une stabilité structurale supérieure par rapport à une surface travaillée durant l'année (Figure 4). Ainsi, le sol non labouré reste mieux agrégé vis-à-vis des aléas climatiques et du cycle dessiccation-humectation. Toutefois, on note une évolution de la stabilité des agrégats en fonction de l'humidité du sol.

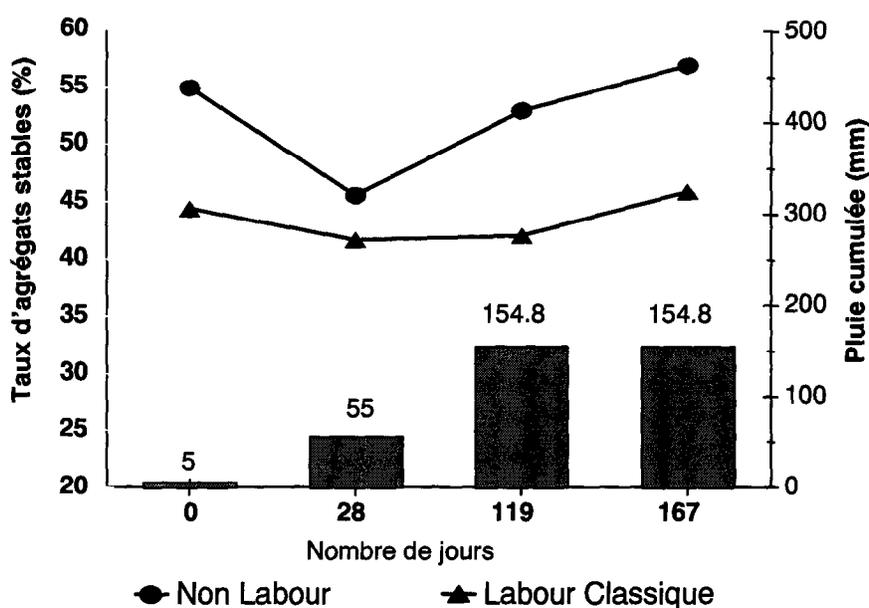


Figure 4. Evolution au cours du temps du taux d'agrégats stables de la couche (0-5 cm) après 5 années d'expérimentation de deux systèmes de travail du sol (non labour avec un couvert de résidus et labour classique au pulvérisateur à disques) (la première mesure est effectuée le 6 octobre 1999) (Ait Cherki, 2000; Mrabet, 2002).

Conclusions

De nombreux travaux de recherche conduits dans des écosystèmes très contrastés sur des modes différenciés de gestion des sols montrent que, aussi bien sous climat tempéré que tropical et subtropical, les systèmes de culture pratiqués en semis direct sans jamais travailler le sol permettent d'améliorer très significativement la qualité des sols (Cambardella et Elliot, 1994; Baker et al., 1996; Benites et al., 1998; Dick et al., 1998; Hussain et al., 1999; Bayer et al., 2000; Séguy et Bouzinac, 1999). Cette étude confirme les résultats de ces travaux en montrant que le semis direct permet de reconstituer la structure des sols marocains, particulièrement non cohérents et désagrégés.

Cette étude a montré que le semis direct a aidé à construire une bonne structure avec le temps, qui est fortement souhaitable pour soutenir la productivité agricole et pour préserver la qualité environnementale (Lal, 1991).

Une corrélation positive a été trouvée entre le taux de matière organique et la stabilité structurale des 47 sols étudiés. En outre, plus le taux d'argile augmente, plus la stabilité structurale s'améliore. Toutefois, les mesures de stabilité effectuées ont montré que seulement 32% des sols présentent une stabilité supérieure à la moyenne. Ceci montre que les sols marocains sont sensibles aux différents processus de dégradation. Les agrégats de dimension 1-2 mm utilisés dans la méthode de Kemper et Rosenau limitent l'interprétation des différences de stabilité structurale entre les différents sols. La méthode de Kemper et Rosenau est plus intéressante pour comparer des pratiques culturales au niveau d'un même sol mais reste encore mal adaptée pour comparer des sols différents. C'est la raison pour laquelle une collaboration entre INRA France et INRA Maroc a été mise en place, afin de tester la méthode Le Bissonnais (1996) aux sols marocains des zones semi-arides.

Remerciements

Les auteurs remercient la coopération franco-marocaine pour le financement de l'étude sur la structure des sols marocains dans le cadre du projet PRAD 01-08. Melle Hafida Nachat et Mr Rachid Ait Cherki sont remerciés pour leur aide dans les mesures de la stabilité structurale.

Bibliographie

- Ait Cherki R., 2000.** Comportement physique du sol sous différents systèmes de labour et de rotations céréalières en milieu semi-aride Marocain. Thèse de 3^{ème} Cycle d'amélioration de la production agricole. Fac. Sciences et Techniques, Settat. 66p.
- Amézketa E., M.J. Singer Y., Le Bissonnais., 1996.** Testing a new procedure for measuring water stable aggregation. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 60:888-894.
- Amézketa E., 1999.** Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14:83-151.
- Baker C.J., Saxton K.E., Ritchie W.R., 1996.** No-tillage seeding. *Science and Practice.* CAB International, Wallingford, Oxon, UK. 158p.
- Barthès B., Albrecht, A., Asseline, J., De Noni, G., Roose, E., Viennot, M., 1998.** Pratiques culturales et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron). *Etude et Gestion des Sols.* 5 :157-170.
- Barthès B., Albrecht, A., Asseline, J., De Noni, G., Roose, E., 1999.** Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean Highland (Aveyron, France). *Comm. Soil Sc. Plant Anal.* 30:1929-1938.
- Barthès B., Roose, E., 2001.** La stabilité de l'agrégation, un indicateur de la sensibilité des sols au ruissellement et à l'érosion : validation à plusieurs échelles. *Cah. Agric.* 10 :185-193.
- Bayer C., Mielniczuk J., Amado T.J.C., Martin-Neto L. Fernandes, S.V., 2000.** Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil & Tillage Res.* 54: 101-109.
- Benites J., Chuma E., Fowler R., Kienzle J., Molapong K., Manu J., Nyagumbo I., Steiner K., van Veenhuizen R., 1998.** Conservation tillage for sustainable agriculture. In. *Proceedings of international workshop.* Harare, Zimbabwe, June 22-27, 1998.
- 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. *Proceedings of I World Congress on Conservation Agriculture, Madrid 1-5, October.* Garcia-Torres et al. (eds). Vol 2:281-286.
- Bouzza A., 1990.** Water conservation in wheat rotations under several management and tillage systems in semi-arid areas. PhD Diss. Univ. of Nebraska, USA. 200p.

- Cambardella C.A., Elliot E.T., 1994.** Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 123-130.
- Dick W.A., Blevins R.L., Frye W.W., Peters S.E., Christensen D.R., Pierce F.J. Vitosh M.L., 1998.** Impacts of agricultural management practices on C sequestration in forest-derived soils of the eastern Corn Belt. *Soil & Tillage Res.* 47: 235-344.
- Derpsch R., 2001.** Conservation tillage, no-tillage and related technologies. In: *Proceedings of I World Congress on Conservation Agriculture, Madrid 1-5, October.* Garcia-Torres et al. (eds). Vol 1:161-170.
- 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 semis direct. *Rapport annuel INRA Centre Aridoculture.* pp 171-174.
- El-Brahli, A., Mrabet R., 2000.** La jachère Chimique: Pour relancer la céréaliculture non-irriguée en milieu semi-aride Marocain. In *Actes de la Journée Nationale sur le Désherbage des Céréales.* Centre Aridoculture Settat 23 Novembre 2000. Association Marocaine de Malherbologie. pp: 133-145.
- Hussain I., Olson K.R., Ebelhar, S.A., 1999.** Long-term tillage effects on soil chemical properties and organic matter fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1335-1341.
- Kacemi M., 1992.** Water conservation, crop rotations and tillage systems in semi-arid Morocco. Ph.D. Dissertation. Colorado State Univ. Fort Collins, CO. USA. 200p.
- Kacemi M., Peterson G.A., Mrabet R., 1995.** Water conservation, wheat-crop rotations and conservation tillage systems in a turbulent Moroccan semiarid agriculture. In: *Proceedings Conference on challenges in Moroccan dryland agriculture.* El Gharrou et al. (eds). INRA-Rabat. INRA-publication. pp 83-91
- Kemper W.D., Rosenau R.C., 1986.** Aggregate stability and size distribution. In: A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd ed., Agronomy, vol. 9.* Soil Sci. Soc. Amer., Madison, WI, pp. 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. Thèse de 3^{ème} Cycle en Géologie. Fac. des Sciences, El Jadida, Maroc. 62p.
- 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. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Le Bissonnais Y., Le Souder Ch., 1995.** Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols.* 2 :43-56.
- Monnier G., Stengel P., Bodet J.M., 1976.** Conséquences de la répartition des matières organiques sur le comportement du sol. In: *Simplification du travail du sol en production céréalière.* ITCF, Paris, France. pp: 151-165.
- Mrabet R., 2000.** Long-term No-tillage influence on soil quality and wheat production in semiarid Morocco. In: *Proceedings of 15th ISTRO Conference "Tillage at the Threshold of the 21st Century: Looking Ahead.* Morison, J.E. (ed), Fort Worth, Texas USA July 2-7, 2000.
- Mrabet R., 2001.** No-tillage Farming: Renewing Harmony Between Soils and Crops in Semiarid Morocco. In: *Proceedings Third International Conference on Land Degradation (ICLD3) and Meeting of the IUSS Subcommittee C – Soil and Water Conservation.* Rio de Janeiro, Brazil, September 17-21, 2001.
- 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 & Tillage Res.* 57:225-235.
- Mrabet, R., 2002.** Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. *Soil & Tillage Res.* 66:119-128.
- Oades J.M., 1984.** Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 76:319-337.

- Perfect E., Kay B.D., van Loon W.K.P., Sheard R.W., Pojasok T., 1990.** Rates of change in soil structural stability under forages and corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:225-235.
- Rasiah V., Kay B.D., Martin T., 1992.** Variation of structural stability with water content: Influence of selected soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1604-1609.
- Saber, N., Mrabet, R., 2002.** Impact of no-tillage and crop sequence on selected soil quality attributes of a vertic calcixeroll soil in Morocco. *Agronomie* 22:451-459.
- Saidi D., Douaoui A., Le Bissonnais Y., Walter C., 1999.** Sensibilité de la surface des sols des plaines du Chélif à la dégradation structurale. *Etude et Gestion des Sols.* 6 :15-25.
- Séguy L., Bouzinac S., 1999.** Cultiver durablement et proprement les sols de la planète, en semis direct. CIRAD-CA/GEC. 47p.
- Steiner K., 1998.** Conserving natural resources and enhancing food security by adopting No-Tillage. An Assessment of the potential for soil-conserving production systems in various agro-ecological zones of Africa. GTZ Eschborn, Tropical Ecology Support Program, TÖB publication number: TÖB F-5/e, 53pp.
- Ternan R.E., Williams A.G., Elmes A., Hartley R., 1996.** Aggregate stability of soils in central Spain and the role of land management. *Earth Surface Processes and Landforms.* 21:181-193.

Sabir M., Barthès B., Roose E., 2004. Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15, 1 « Spécial Erosion »: 105-110.

**RESEAU
EROSION**



Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION

Pour citer cet article / How to cite this article

Mrabet, R.; Lahlou, S.; Le Bissonnais, Y.; Duval, O. - Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains : influence des techniques culturales simplifiées, pp. 405-415, Bulletin du RESEAU EROSION n° 23, 2004.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr