

# Rôle des différentes fractions organiques dans la stabilité structurale des sols à textures riches en sables du Nord et du Centre de la Tunisie

A. Bouajila<sub>(1)</sub>, N. Brahim<sub>(2)</sub> et T. Gallali<sub>(2)</sub>

- 1) Unité de Recherche de Géoressources, Géosystèmes et Géoenvironnements. Faculté des Sciences de Gabès. Université de Gabès. Tunisie.
- 2) Faculté des Sciences de Tunis. Université El Manar. Tunisie.

\* : Auteur correspondant : bouajila\_ah@yahoo.fr

## RÉSUMÉ

Ce travail vise à montrer la contribution des différentes fractions organiques dans la stabilisation des agrégats des horizons de surface de sols à textures grossières dans les régions subhumide et semi-aride de la Tunisie. Au cours de cette étude, on a déterminé les fractions, totale (COT), particulaire (COP), humique (SH) et des polysaccharides (PEEC), de 7 horizons de surface de sols. La stabilité structurale a été évaluée à sec selon la technique Youker et McGuinness (1956) et la stabilité à l'eau est déterminée par la méthode de Le Bissonnais (1996). Elles sont exprimées en diamètres moyens pondérés respectivement DMPsec et DMPLeBiss.

L'étude des résultats a permis de constater que les différents horizons sont stables à sec. Lors de l'application d'un traitement de réhumectation, les sols sont stables à très stables (DMPLeBiss élevés). Cette stabilité à l'humide est liée à la matière organique qui est le premier responsable de la formation de macro-agrégats résistants à l'effet désagrégeant de l'eau. De plus, des coefficients de corrélation significatifs (0,8 à 0,9  $p < 0,01$ ) sont enregistrés entre les différents MWDLeBiss et les principales fractions organiques. Les coefficients les plus élevés sont, toutefois, détectés entre le test d'humectation rapide et la fraction particulaire (COP) de la matière organique. Ces résultats prouvent que la stabilisation des agrégats des sols riches en sables contre un stress hydrique est due à la matière organique d'une manière générale et principalement à la présence de la forme particulaire. Sur cette dernière se développe une activité intense de décomposition par les champignons assurant l'édification, en particulier, des macro-agrégats très résistants à la destruction lors d'une humectation rapide.

## Mots clés

Matière organique, matière organique particulaire, stabilité structurale, texture grossière, régions arides.

**SUMMARY****ROLE OF DIFFERENT ORGANIC MATTER FRACTIONS IN STRUCTURAL STABILITY OF SOILS WITH HIGH CONTENT OF SAND IN NORTH AND CENTRAL REGIONS OF TUNISIA**

Changes in soil organic carbon (SOC) may strongly affect soil structure and soil physical properties with possible feedback effect on the soil erosion.

Different organic fractions contribute to aggregate stabilization, including particulate organic carbon (Pikul et al., 2007) microbial biomass in particular fungi (Degens, 1997), microbial-derived polysaccharides (Haynes and Francis, 1993) and humic substances (Piccolo and Mbagwu, 1999). However, the relations between organic matter content of soil and its aggregate stability are complex not clearly understood (Puget et al., 1995) and require more investigations (Barthès et al., 2008).

The aim of this study was to examine the relationship between different organic matter fractions and aggregate stability in some upper horizons with high content of sand soils in Tunisia. Seven soils were chosen (figure 1) in subhumid and semiarid regions of Tunisia, then described and analysed (table 1 and 2).

Particle size analysis of these soils reveals that sand is the most abundant fraction (table 2). The SOC content ranged from 3,3 to 4,8 g/kg of the soil dry mass. Unsurprisingly, average SOC content decreased from forest to cropped soils. High percentage POC, low content of humic substances (HS) and hot water extract polysaccharids were shown in these soils (table 2). POC was the mainly fraction of organic carbon storage in these soils (figure 2). Furthermore, our results showed important dry aggregate stability ( $DMP > 2.7$  mm) of all samples (figure 3). In the case of wet aggregate stability tests, the A horizons of all experimental soils were characterized by large macro aggregate percentages (figure 4) and smaller DMPLeBiss in all treatments (Figure 5) conversely to the dry test. Indeed, average of DMPLeBiss of the tree treatments was ranged from 0.84 to 2,97 mm. This is the case because the application of water stress on the samples decreases their stability. Moreover, Fast wetting, in general, was the most destructive treatment of aggregate (figures 4 and 5).

**Key-words**

Organic matter, particulate organic matter, aggregate stability, sand, Tunisia.

**RESUMEN****PAPEL DE LAS DIFERENTES FRACCIONES ORGÁNICAS EN LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE LOS SUELOS CON TEXTURAS RICAS EN ARENAS DEL NORTE Y DEL CENTRO DE TÚNEZ**

Las modificaciones en el carbono orgánico del suelo (SOC) puede afectar fuertemente la estructura del suelo y sus propiedades físicas con una posible retroacción sobre la erosión del suelo.

Diferentes fracciones orgánicas contribuyen a la estabilización de los agregados, que incluyen el carbono orgánico particular (POC) (Pikul et al., 2007), la biomasa microbiana en particular fúngica (Degens, 1997), los polisacáridos derivados de microorganismos (Haynes and Francis, 1993), y las sustancias húmicas (HS) (Piccolo and Mbagwu, 1999). Sin embargo, las relaciones entre el contenido en materia orgánica del suelo y la estabilidad de los agregados son complejas no claramente entendidas (Puget et al., 1995) y requieren más investigaciones (Barthès et al., 2008).

El objetivo de este estudio era examinar las relaciones entre diferentes fracciones de la materia orgánica y la estabilidad de los agregados en algunos horizontes de superficie con un contenido elevado en arenas en Túnez. Se eligieron siete suelos (figura 1) en regiones sub-húmedas y semiáridas de Túnez, que fueron descritos y analizados (tabla 1 y 2). El análisis granulométrico de estos suelos muestra que la arena es la fracción más abundante (tabla 2). El contenido en SOC varía de 3,3 a 4,8 g/kg de suelo seco. Sin sorpresa, el porcentaje del contenido en SOC decrece de los suelos de la selva a los cultivos. Se muestran en la tabla 2 porcentaje elevado de POC, contenido bajo de sustancias húmicas (HS) y polisacáridos extraídos por agua caliente. POC es la fracción la más importante del almacenamiento del carbono orgánico en estos suelos (figura 2).

Se evaluó la estabilidad estructural en seco según la técnica Youker y Mc guines (1956) y se determinó la estabilidad al agua por el método de Le Bissonnais (1996). Se expresaron en diámetros medios ponderados respectivamente  $DMP_{seco}$  y  $DMPLeBiss$ . Nuestros resultados muestran una elevada estabilidad de los agregados en seco ( $DMP_{seco} > 2,7$  mm) de todas las muestras (figura 3). En el caso de los test de la estabilidad de los agregados en húmedo, los horizontes A de todos los suelos estudiados se caracterizaron por porcentajes elevados de macro agregados (figura 4) y el más bajo  $DMPLeBiss$  en todos los tratamientos (figura 5) al contrario de los test en seco. En efecto, el porcentaje de los  $DMPLeBiss$  de los tres tratamientos oscilaron entre 0,84 a 2,97 mm. En efecto la aplicación de un estrés hídrico sobre las muestras decrece su estabilidad. Además, una humectación rápida es en general el tratamiento más destructivo del agregado (figura 4 y 5).

No se encontró correlación significativa entre la estabilidad del agregado en seco y los componentes de la materia orgánica (tabla 3). Sin embargo, la estabilidad del agregado en húmedo se correlacionó fuertemente y positivamente con las principales fracciones orgánicas ( $p < 0,05$ ). De hecho, se encontró una correlación positiva entre la estabilidad del agregado en húmedo y SOC ( $r = 0,92$ ), POC (0,96), y HS (0,85). Se encontraron correlaciones más grandes entre POC y varios tratamientos en húmedo (figura 6 y 7).

Para resumir las relaciones entre diferentes variables analizadas usamos la representación del análisis en componentes principales (ACP) (figura 8). Esta representación subraya fuertemente la asociación entre las fracciones orgánicas y la estabilidad en húmeda de los agregados en los suelos con contenido elevado en arenas.

Los resultados principales del estudio pueden ser resumidos así: la estabilidad en seco de los agregados en los suelos estudiados muestran ninguna asociación con las fracciones de la materia orgánica. Es probablemente el resultado de la presencia de arcilla y de carbonato de calcio. Sin embargo, la estabilidad en húmedo de los agregados es fuertemente relacionada al contenido en materia orgánica. POC es la principal fracción que protege los suelos frente a la humectación. Esta fracción refuerza la actividad biológica y tiene como resultado la formación de macro-agregados estables (figura 9).

Nuestras conclusiones subrayan significativamente el papel de los componentes orgánicos en los suelos con altos contenidos en arenas en Túnez sobre la estabilidad de los agregados. La degradación de estas propiedades provoca la degradación del suelo por erosión y causa una accesibilidad más alta para la mineralización del carbono orgánico que disminuye la emisión de CO<sub>2</sub> de los suelos principalmente en clima árido.

### Palabras clave

Materia orgánica, materia orgánica particular, estabilidad del agregado, arena, regiones áridas, Túnez.

En Tunisie, les sols caractérisés par une texture riche en limons et en sables et généralement pauvres en matière organique, occupent une grande surface du pays (Bouajila, 2009; Brahim, 2011). Cette situation s'est particulièrement reflétée sur la stabilité des agrégats et conséquemment sur la susceptibilité au tassement et à l'érosion hydrique et éolienne. En effet, une bonne stabilité structurale est importante pour maintenir la porosité des sols et ainsi améliorer leur fertilité et limiter leur érodibilité (Bronick and Lal, 2005 ; Roose *et al.*, 1993).

Plusieurs travaux, sur des sols riches en argiles ou en limons, ont montré une étroite relation entre la stabilité de la structure et la nature et les caractéristiques de la matière organique (Annabi *et al.*, 2007; Ashagrie *et al.*, 2007; Oades, 1984). Dès l'apport de cette dernière sous différentes formes de résidus, une amélioration importante de la stabilité structurale est détectée à partir de la première semaine et se développe sur toute l'année suivante (Monnier, 1965). Selon Chenu *et al.* (2011), la teneur en carbone organique est un facteur explicatif majeur de la stabilité structurale. Toutes les fractions de la matière organique assurent un rôle agrégeant: la fraction particulaire (Six *et al.*, 2004), les polysaccharides (Haynes and Francis, 1993), les substances humiques (acides fulviques et acides humiques) (Piccolo and Mbagwu, 1999) et la biomasse microbienne (Degens, 1997). Elles agissent sur la stabilité des agrégats, essentiellement, par deux mécanismes (i) formation des micro-agrégats par la liaison de particules minérales avec les substances humiques ou bien par l'enchevêtrement des particules avec les racines et les hyphes mycéliens (ii) diminution de la mouillabilité qui atténue

l'intensité de la destruction des agrégats durant leur humidification (Chenu *et al.*, 2000).

Toutefois, les relations entre la matière organique et la stabilité des agrégats sont complexes et nécessitent plus d'investigation (Barthès *et al.*, 2008; Puget *et al.*, 1995). Les divers facteurs intervenant dans ces interactions ont été abordés dans les sols européens (Chenu *et al.*, 2011) mais pas assez dans les zones arides. En effet, ces relations sont difficiles à établir pour toutes les régions à cause des différences climatiques et pédologiques (Pikul *et al.*, 2007). La caractérisation précise de ces relations se reflétera nécessairement au niveau des modèles de prédiction de la stabilité structurale et ceux des fonctions de pédo-transferts.

C'est dans ce contexte que s'intègre notre travail visant à étudier la relation entre les différentes fractions de la matière organique et la stabilité des agrégats dans les horizons de surface riches en sables de sept différents sols en Tunisie.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Les sols

Les sols appartiennent à des étages bioclimatiques différents de l'humide à l'extrême nord du pays au semi-aride dans les régions centrales. Les précipitations se réduisent selon cet axe de 1000 mm/an à 400 mm/an. Par contre, les températures annuelles augmentent de 18 °C à 20 °C (figure 1).

Les sols se développent à partir des roches calcaires dures, des alluvions calcaires ou des grès. Ce sont des sols forestiers ou cultivés (*tableau 1*). Ils consistent selon la classification CPCS (1967) aux: sol brun acide (sol S1), sol d'apport fluviatile (sol S2), sol isohumique (sol S3), lessivé acide (sol S4), sol d'apport fluviatile (sol S5), sol brun fersiallitique lessivé (sol S6) et un sol brun lessivé (sol S7). Le prélèvement des échantillons a concerné toute la profondeur de l'horizon de surface (*tableau 1*) qui présente généralement les plus fortes teneurs en matière organique et qui est le plus exposé aux facteurs de stress.

## Caractérisations physico-chimiques

Les échantillons séchés à l'air sont ensuite émottés et tamisés à 2 mm ont fait l'objet des analyses suivantes: le dosage du carbone organique total (COT) selon la méthode Anne (1945), l'évaluation des carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) a été réalisée à l'aide d'un calcimètre de Bernard, l'analyse granulométrique est effectuée selon la technique de Pipette de Robinson et le pH- $\text{H}_2\text{O}$  mesuré dans le rapport sol/solution au 2/5.

## Détermination du taux du carbone organique particulaire (COP)

Le (COP) est déterminé selon la méthode de Cambardella and Elliott (1993). Une prise d'échantillon (25 g) tamisée à 2 mm a été mise dans 100 ml d'une solution d'hexaméthaphosphate de sodium (5 g/l). Après agitation horizontale pendant une heure, l'échantillon est rincé plusieurs fois à l'eau distillée sur un tamis de maille 50  $\mu\text{m}$ . La fraction du sol restante sur le tamis est séchée pendant 24 heures à 25 °C puis pesée et

Figure 1 - Localisation des sites d'échantillonnage.

Figure 1 - Localisation of sampling sites.

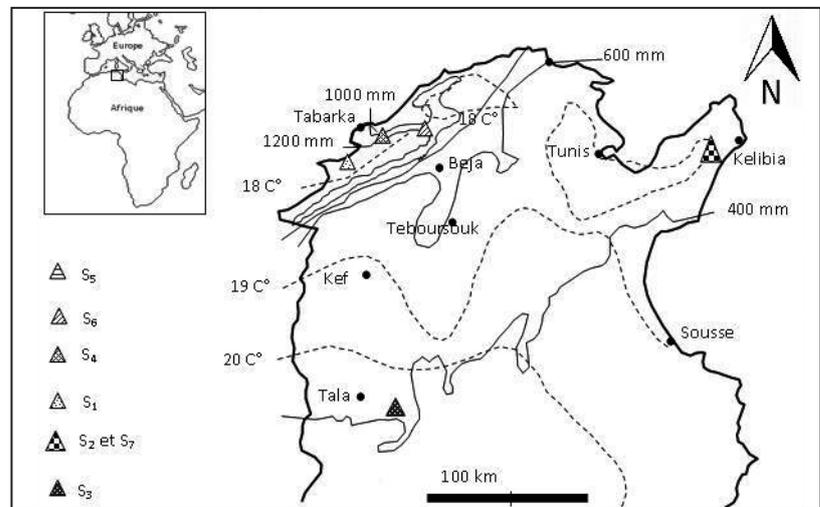


Tableau 1 - Caractéristiques des sols étudiés.

Table 1 - Studied soils characteristics.

Sols	Classification (CPCS, 1967)	Occupation du sol	Roche mère	Localisation	Coordonnées	Epaisseur horizon A (cm)
S <sub>1</sub>	Sol brun acide	Sol forestier	Gréseuse	Ain Draham	36°43'26.32"N 8°40'46.24"E	10
S <sub>2</sub>	D'apport fluviatile	Sol cultivé	Carbonatée (Alluvium)	Cap Bon	36°53'6.87"N 11° 2'51.25"E	18
S <sub>3</sub>	Isohumique	Sol cultivé	Calcaire dur	Kasserine	35°32'31.51"N 8°53'32.30"E	25
S <sub>4</sub>	Lessivé acide	Sol cultivé	Gréseuse	Nefza	36°57'23.87"N 8°56'11.41"E	12
S <sub>5</sub>	D'apport fluviatile	Sol cultivé	Carbonatée (Alluvions)	Sedjnane	37° 8'25.53"N 9°16'18.00"E	17
S <sub>6</sub>	Brun fersiallitique lessivé	Sol forestier	Gréseuse	Tamra	37° 2'39.20"N 9° 6'22.29"E	15
S <sub>7</sub>	Sol brun lessivé	Sol forestier :	Calcaire dur	Menzel Tmim	36°40'20.33"N 10°40'18.48"E	25

**Tableau 2** - pH, granulométrie, taux de carbonate de calcium et teneur des différentes fraction organiques des sols: carbone organique total (COT), carbone organique particulaire COP, polysaccharides extraites à l'eau chaude (PEEC) et substances humiques (SH) dans tous les échantillons.

**Table 2** - pH, soil texture, carbonate calcium (CaCO<sub>3</sub>) content and different organic fraction analysis: Soil organic carbon (SOC), particulate organic carbon (POC), Hot water extract polysaccharides (HWE) and humic substances (HS) across all samples.

SOL	pH	A (%)	L (%)	SF (%)	SG (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	COT (g/kg)	COP (g/kg)	PEEC (g/kg)	SH (AF+AH)(g/kg)
S <sub>1</sub>	6,4	20,1	26,2	32,1	20,2	0,0	33,13	20,72	0,09	9,04
S <sub>2</sub>	6,9	27,0	16,1	39,5	16,6	2,2	8,99	4,30	0,09	0,14
S <sub>3</sub>	7,3	15,7	17,0	31,1	34,9	6,8	4,88	4,54	0,03	0,04
S <sub>4</sub>	4,8	15,4	17,9	38,3	28,7	0,0	29,36	12,62	0,08	5,43
S <sub>5</sub>	6,3	12,6	19,0	39,2	27,8	0,0	5,47	3,62	0,06	0,03
S <sub>6</sub>	5,9	14,8	32,7	23,1	28,3	0,0	26,83	14,04	0,25	7,07
S <sub>7</sub>	7,0	23,8	18,0	51,9	5,6	4,5	15,97	12,80	0,10	0,20

broyée. Cette fraction est ensuite analysée pour son contenu en carbone.

### Extraction des polysaccharides à l'eau chaude (PEEC)

Après homogénéisation du sol congelé, les polysaccharides extracellulaires microbiens sont mesurés sur une masse de sol humide de 1,25 g. L'extraction se fait dans 20 ml d'eau MilliQ dans des tubes à centrifuger en polycarbonate. Après 24 heures d'extraction statique dans une étuve à 80 °C, une centrifugation durant 20 minutes à 30.000 g est réalisée pour clarifier l'extrait. Le surnageant est recueilli à l'aide d'une pipette. Le dosage des sucres contenus dans ces extraits se fait par la méthode de Dubois *et al.*, (1956).

### Dosage des Substances humiques (SH)

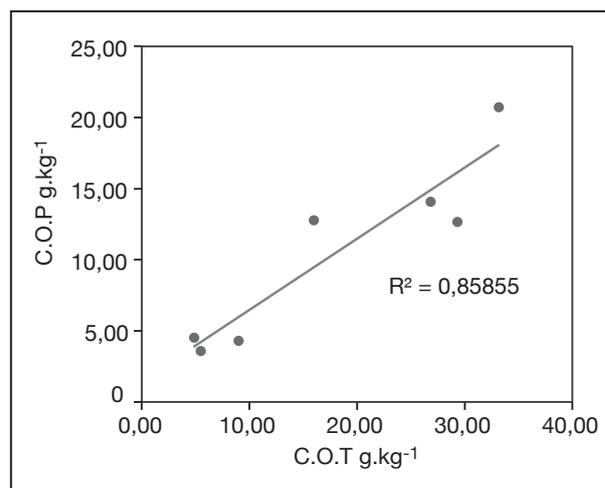
Le fractionnement (Francou, 2003) consiste à extraire à l'aide de 100 ml de NaOH (0,1 N), les substances humiques contenues dans 2 g de sol sec et broyé à 2 mm. Le carbone organique contenu dans la phase liquide alcaline (CSH) est analysé par combustion à 680 °C et analyse du CO<sub>2</sub> dégagé par détection infrarouge (Shimadzu-TOC- 5050A).

### Mesure de la stabilité structurale

La stabilité structurale à sec a été évaluée par la méthode de Youker et McGuiness (1956). Une prise de sol (150 g), séchée à l'air libre est mise dans une colonne de tamis de mailles 10; 8; 6; 5; 4; 2; 1 et 0,25 mm, animée d'un mouvement à 1440 vibration/mn pendant 5 minutes. Le refus de chaque tamis est pesé (Wi en g). L'indice de stabilité à sec

**Figure 2** - Régression entre le COT et (a) le COP, (b) le SH.

**Figure 2** - Linear regression between SOC and (a), POC, (b) (SH).



est défini par le diamètre moyen pondéral « DMPsec » calculé selon la formule suivante:

$$DMPsec = \sum Xi.Wp$$

$Xi$  = diamètre moyen de deux classes de tamis successifs

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

La détermination de la stabilité à l'humide (Le Bissonais, 1996) est basée sur l'appréciation de la distribution granulométrique des agrégats après application de trois tests différents sur des agrégats initialement calibrés à 3-5 mm. Les trois tests sont:

**Tableau 3** - Corrélations de Pearson ( $p \leq 0,05$ ) entre les résultats des tests de stabilité structurale et les différentes fractions organiques.

**Table 3** - Pearson correlation ( $p \leq 0,05$ ) between results of structural stability tests and different organic matter fractions.

Variables	COT	COP	PEEC	SH
DMPLeBiss <sub>HR</sub>	0,94	0,94	0,35	0,86
DMPLeBiss <sub>DM</sub>	0,80	0,93	0,55	0,82
DMPLeBiss <sub>HL</sub>	0,88	0,89	0,42	0,76
DMPLeBiss <sub>Moy</sub>	0,92	0,96	0,45	0,85
DMPsec	-0,24	-0,13	0,33	-0,38

- humectation rapide: HR
- désagrégation mécanique par agitation après réhumectation dans l'éthanol: DM
- humectation lente par capillarité: HL

Après séchage, la fraction  $> 0,05$  mm est passée sur une colonne de 6 tamis de 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1; et 0,05 mm. La fraction  $< 0,05$  mm est obtenue par déduction par rapport au poids initial. La distribution granulométrique obtenue permet de calculer le diamètre moyen pondéré DMPLeBiss des agrégats issus de chacun des trois tests.

Pour chacun des tests utilisés, un DMPLeBiss est calculé ainsi: DMPLeBiss<sub>HR</sub>, DMPLeBiss<sub>DM</sub>, DMPLeBiss<sub>HL</sub> et un « DMPLeBiss<sub>Moy</sub> » désigne la moyenne des trois DMPLeBiss calculés.

## RÉSULTATS

### Les caractéristiques des horizons A des sols

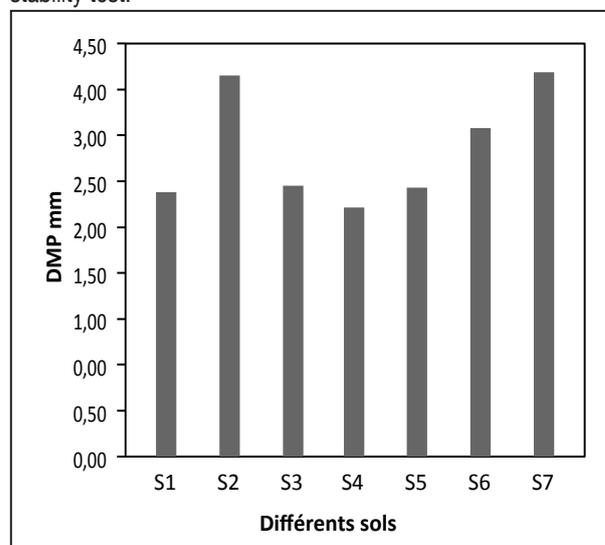
Les épaisseurs des horizons de surface de ces sols sont limitées entre 10 et 25 cm. Ces horizons sont caractérisés par des pH compris entre 4,8 et 7,3. Ils présentent, de plus, des faibles pourcentages de carbonate de calcium ( $< 6,8\%$ ). Par contre, les teneurs en sables dépassent 50 %: ce sont particulièrement des sables fins (tableau 2).

### Répartition des différentes fractions organiques

Dans les sols forestiers S1, S4, S6 et S7, les teneurs en carbone organique total sont respectivement de l'ordre de 33,1; 29,3; 26,8 et 15,9 g/kg de sol sec. Les teneurs en COP dans les échantillons analysés sont plus élevées dans les horizons A des sols forestiers que dans les horizons Ap. Les teneurs sont réparties sur un intervalle de 3,6 à 20,7 g/kg de sol (tableau 2). Les polysaccharides extraits à l'eau chaude (PEEC) sont peu abondants dans ces sols. Ce sont des composés instables et facilement accessibles à la biodégradation (Annabi, 2007). Des taux plus importants (allant jusqu'à 9,04 gC/kg) sont en revanche enregistrés dans le cas des substances humiques (SH). Les

**Figure 3** - Diamètres moyens pondérés (DMPsec) des différents échantillons lors du test de stabilité à sec.

**Figure 3** - Different (DMPLeBiss) derived from dry structural stability test.



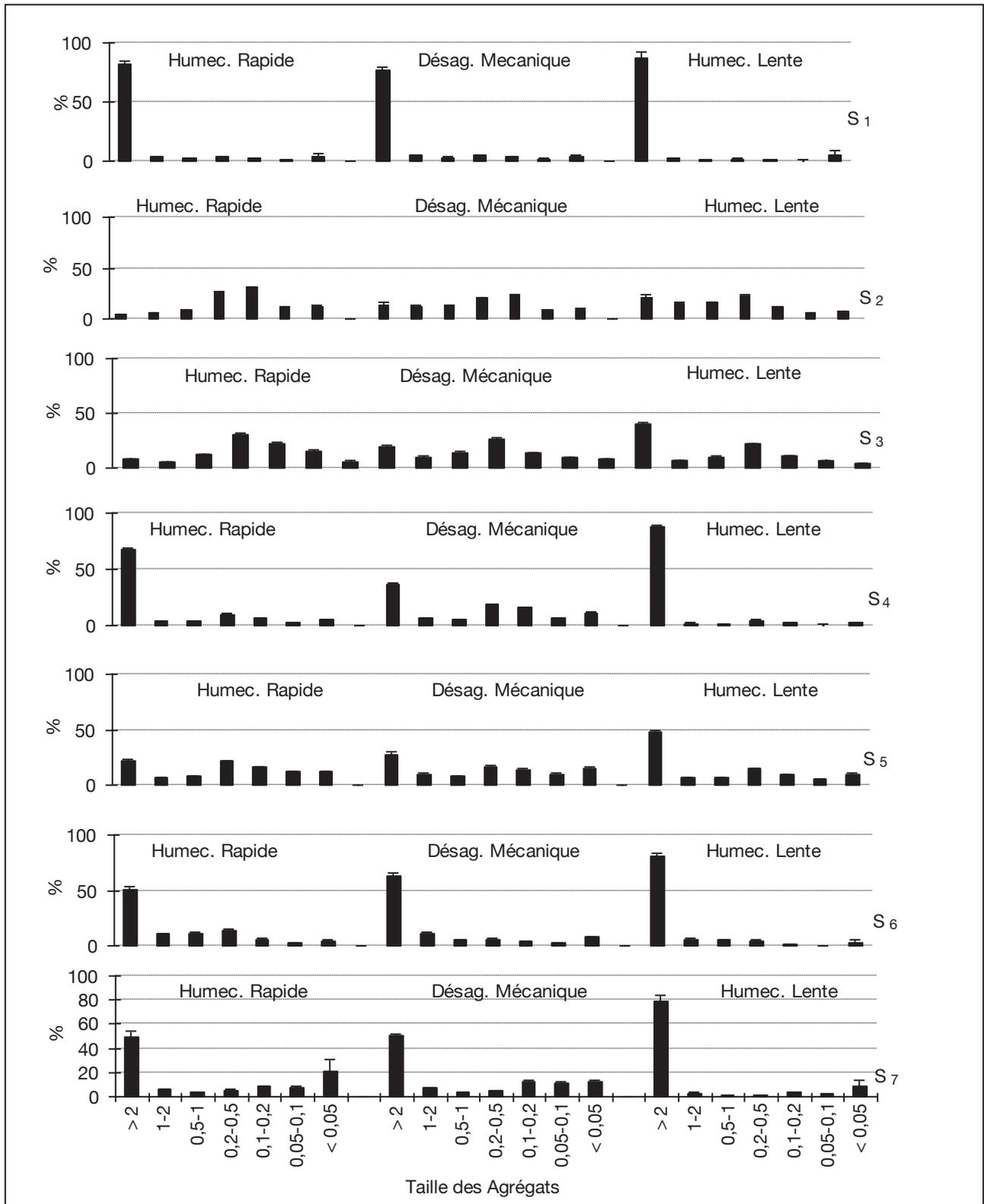
concentrations les plus importantes en SH sont associées aux sols forestiers acides. Selon Gisi (1997), la baisse du pH dans le sol augmente le taux des SH. Dans ces différents sols, la fraction particulière constitue la principale forme de la matière organique (figure 2).

### Stabilité structurale

Pour différencier, dans ce qui suit, les résultats des diamètres moyens pondérés relatifs aux deux tests, nous adoptons le terme DMPsec pour la stabilité à sec et le terme DMPLeBiss pour les tests à l'humide. Les valeurs de DMPsec sont élevées pour tous les échantillons, supérieures à 2,71 mm (Sol S4) (figure 3). Ce sont donc des sols stables à l'état sec.

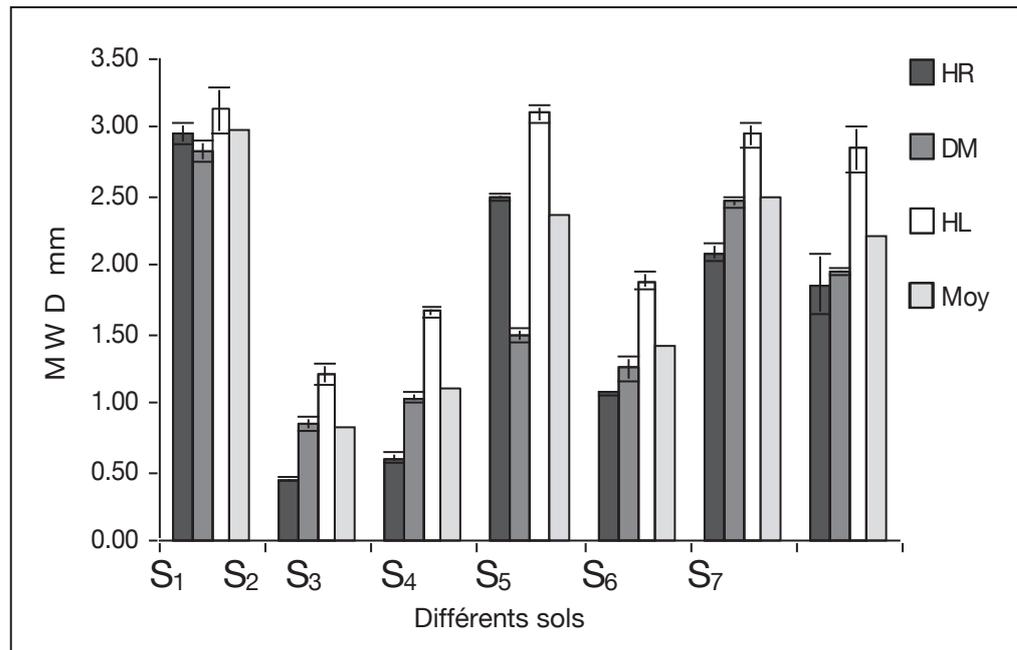
La figure 4 présente les deux groupes d'histogrammes obtenus après les différents tests de stabilité à l'eau. Dans le premier, regroupant les sols S1, S4, S6 et S7, on observe clairement une proportion importante en macro-agrégats ( $> 250 \mu\text{m}$ )

**Figure 4 - Répartition des agrégats selon leur diamètre dans les différents échantillons.**  
**Figure 4 - Aggregates distribution according to their diameter across all samples.**



**Figure 5** - Résultat de la mesure des MeanWeightdiameter (DMPLeBiss) des différents échantillons.

**Figure 5** - Different (DMPLeBiss) derived from Le Bissonnais structural stability test.



concentrée (80 %) dans le refus de la maille de 2 mm (sol S1 et S4). Le deuxième représente les sols agricoles (S2, S3 et S5) montrant une répartition plutôt hiérarchisée toutefois riche en macro-agrégats.

Le sol le plus stable à l'état sec devient le moins stable après un test d'humectation (sol S5) (figure 5). Les DMPLeBiss<sub>Moy</sub> les plus importants sont enregistrés dans le cas des sols forestiers. De plus, entre les trois tests de stabilité à l'humide, le test humectation rapide est le plus destructif vis-à-vis des agrégats. En effet, les valeurs des DMPLeBiss<sub>HR</sub> sont les plus faibles corroborées par les valeurs des DMPLeBiss<sub>DM</sub> (figure 5).

### Rôle des différentes fractions organiques dans la stabilisation des agrégats

Les résultats des tests de corrélation ont dévoilé que la stabilité structurale à sec n'est associée à aucune fraction organique. Par contre, on peut clairement remarquer la présence d'associations très nettes entre les indices de stabilité à l'humide et l'ensemble des fractions organiques analysées. Plusieurs corrélations positives et significatives sont mises en évidence (tableau 3). Ainsi, les différents DMPLeBiss<sub>Moy</sub> sont significativement corrélés à la fraction totale de la matière organique ( $R^2 = 0,92$ ). Ils sont d'un autre côté davantage associés à la fraction particulaire de ce carbone qu'à la fraction humique avec respectivement des coefficients de détermination de l'ordre de 0,96 et 0,85. De plus, les corrélations les plus importantes sont enregistrées entre les DMPLeBiss des différents traitements et les teneurs en COP avec des coefficients de détermination de l'ordre de 0,94; 0,93 et 0,89 qui définissent respectivement

les associations entre DMPLeBiss<sub>HR</sub> et COP, DMPLeBiss<sub>DM</sub> et COP; et DMPLeBiss<sub>HL</sub> et COP (figures 5 et 6). Par ailleurs, la matière organique, essentiellement particulaire, assure la stabilité structurale de ces sols riches en sables.

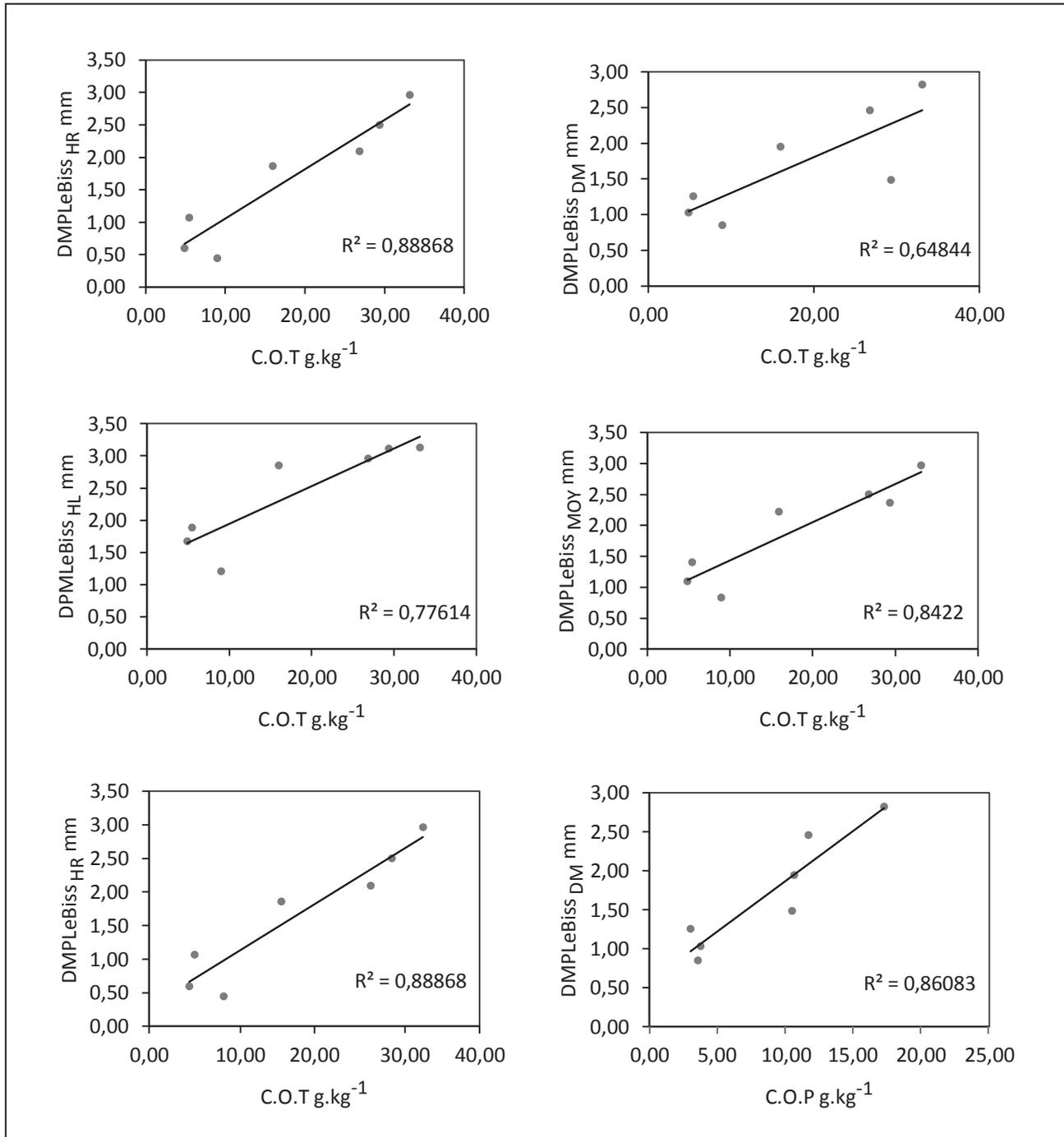
L'Analyse en Composantes Principales (ACP) rassemblant les résultats des analyses et des mesures effectuées résume les différentes interactions (figure 8). Dans cette analyse factorielle, les facteurs agrégeants et les indicateurs de la stabilité structurale sont les variables actives produisant les axes factoriels. On observe clairement que les projections des tests de stabilité sont associées aux différentes fractions de la matière organique. Toutefois, les projections des DMPLeBiss des différents traitements humectation rapide (DMPLeBiss<sub>HR</sub>), désagrégation mécanique (DMPLeBiss<sub>DM</sub>) et humectation lente (DMPLeBiss<sub>HL</sub>) sont principalement colinéaires à la projection des valeurs des COT et des COP. Dans l'ensemble des traitements, les tests d'humectation rapide et de désagrégation mécanique sont les plus associés à la présence de la matière organique particulaire (figures 6a, 6e et 6c), ce qui témoigne bien que sa présence est fondamentale (rôle indirect) dans l'atténuation des processus de désagrégation et d'éclatement suite à l'humectation brutale dans le cas des sols étudiés.

## DISCUSSION

La matière organique particulaire est la principale forme organique dans ces sols. Toutefois, la teneur en COP est nettement plus élevée dans les horizons A des sols forestiers que dans les horizons Ap des sols agricoles. En effet, les litières déposées à la surface des sols forestiers et les racines recyclent

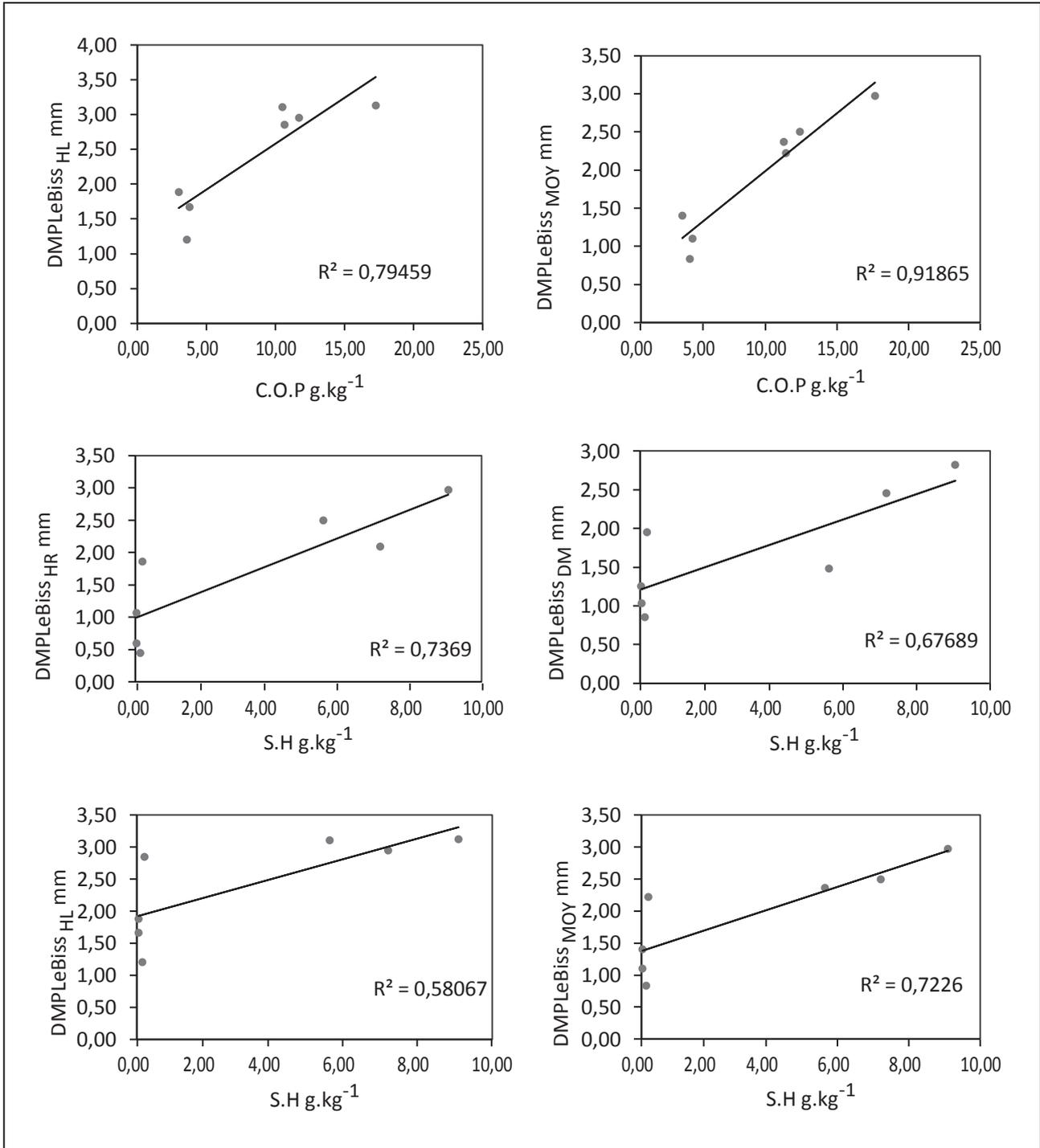
**Figure 6** - Régressions linéaires entre le taux de COT et (a) les DMPLeBiss<sub>HR</sub>, (b) DMPLeBiss<sub>DM</sub>, (c) DMPLeBiss<sub>HL</sub> et (d) DMPLeBiss<sub>MOY</sub>, le taux de COP et (e) les DMPLeBiss<sub>HR</sub> et (f) DMPLeBiss<sub>DM</sub>.

**Figure 6** - Linear regression between COT, and (a) DMPLeBiss<sub>HR</sub> (b) DMPLeBiss<sub>DM</sub> (c) DMPLeBiss<sub>HL</sub> (d) average of; and COP and (e) DMPLeBiss<sub>HR</sub> and (f) DMPLeBiss<sub>DM</sub>.



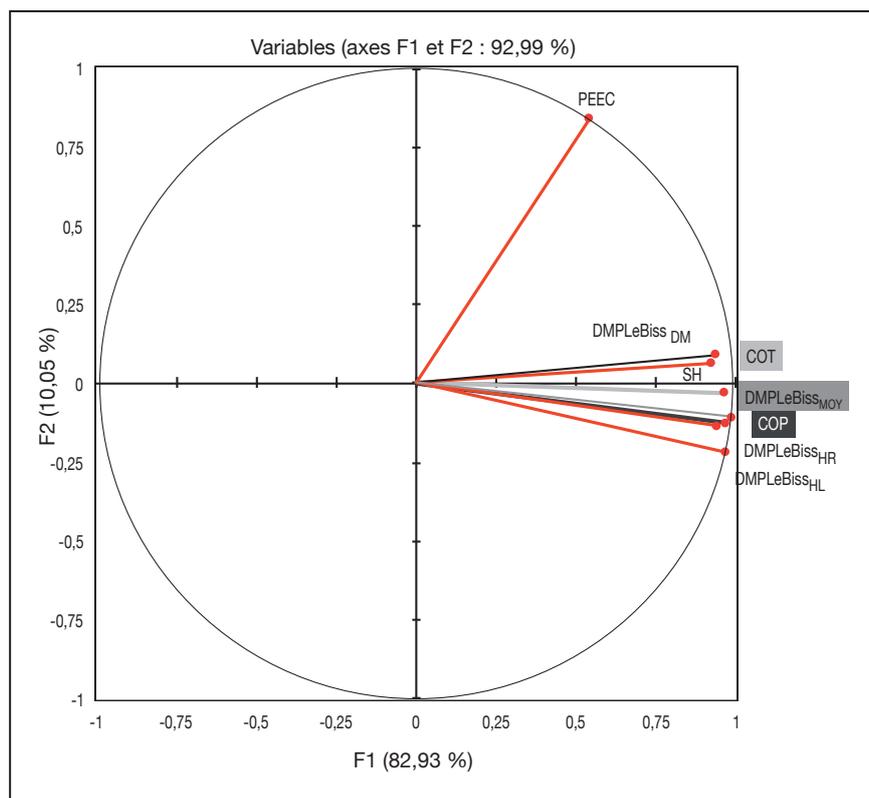
**Figure 7** - Régressions linéaires entre le taux de COP et (a) DMPLeBiss<sub>HL</sub> et (b) DMPLeBiss<sub>Moy</sub>; les teneurs en SH et les (c) DMPLeBiss<sub>HR</sub>, (d) DMPLeBiss<sub>DM</sub>, (e) DMPLeBiss<sub>HL</sub> et (f) DMPLeBiss<sub>Moy</sub>.

**Figure 7** - Linear regression between content of COP, and (a) DMPLeBiss<sub>DM</sub> (b) DMPLeBiss<sub>Moy</sub>; and content of SH and (c) DMPLeBiss<sub>HR</sub> (d) DMPLeBiss<sub>DM</sub> (e) DMPLeBiss<sub>HL</sub> (f) DMPLeBiss<sub>Moy</sub>.



**Figure 8** - Analyse des composantes principales entre les différentes fractions organiques: carbone organique total (COT), le carbone organique particulaire (COP), les polysaccharides (PEEC) et les substances humiques (SH) et les valeurs des différents DMPLeBiss (DMPLeBiss<sub>HR</sub>, DMPLeBiss<sub>HL</sub>, DMPLeBiss<sub>DM</sub> et DMPLeBiss<sub>Moy</sub>) et DMPsec calculés.

**Figure 8** - Principal component analysis of organic fractions and DMPLeBiss values of structural stability.



leur réserve en matière organique d'une manière continue (Garcia-Pausas *et al.*, 2004 ; Ashagrie *et al.*, 2007). De plus, le COP représente entre 43 et 83 % du COT. Le rapport le plus élevé concerne le sol cultivé S3 et les moyennes des rapports pour les sols sont respectivement de l'ordre de 60 % et de 65 % respectivement pour les sols forestiers et les sols agricoles. Ces proportions sont proches de celles (42 à 74 %) déterminées par le même mode opératoire par Chan (Chan, 2001) qui a mené son travail dans des sols riches en sables et évoluant dans un même contexte climatique. Il a montré, de plus, que cette fraction tend à augmenter dans les sols non occupés par une activité agricole. En effet, le COP est sensible aux changements des propriétés des sols par une mise en culture (Cambardella and Elliott, 1993) qui favorise essentiellement l'accélération des processus de la minéralisation (Bongiovanni *et al.*, 2006 ; Li *et al.*, 2007).

Les résultats des différents tests de stabilité des agrégats dévoilent qu'à l'état sec tous les sols étudiés sont stables. En effet, les DMPsec calculés pour ces sols sont similaires aux valeurs enregistrées au Maroc dans les horizons Ap des sols calcimagnésiques (Saber et Marbet, 2002). La faible agressivité du test dans cette technique de stabilité et la variation des facteurs qui interviennent dans la présence des agrégats stables à l'état sec (Hevia *et al.*, 2007) sont à l'origine des valeurs élevées des DMPsec. Selon Fryrear *et al.* (1994), la stabilité à sec est essentiellement due à la fraction minérale. La matière organique

joue un rôle secondaire ou très indirect (Wright and Hons, 2004).

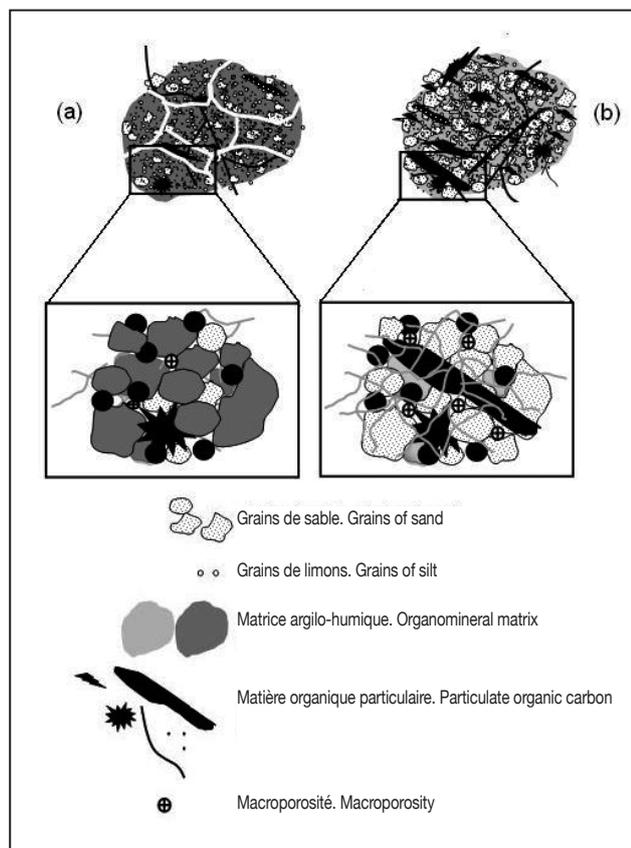
Toutefois, lors de l'application d'une humectation dans des conditions variables, on remarque que les sols se comportent très différemment. En effet, les sols les plus stables sont ceux qui se développent sous les forêts. Ils sont aussi les plus riches en macro-agrégats. On remarque, de plus, que le sol le plus stable à sec est devenu le moins stable après l'humectation.

Même dans les sols riches en sables (pauvre en argile), on peut avoir des taux d'agrégats stables très élevés en présence d'une quantité importante en matière organique (Canton *et al.*, 2009).

Cependant, on a pu constater, clairement, que c'est la fraction particulaire qui assure la stabilité de ces sols. Cette fraction forme des « noyaux » autour desquels se rassemblent les micro-agrégats pour édifier des macro-agrégats stables (Six *et al.*, 2004 ; Jastrow and Miller, 1997). Ce rôle est d'autant plus remarquable dans le cas des textures grossières au vu des coefficients de corrélation enregistrés. Autour de ces matières organiques particulières se piègent les grains de sables et de limons pour former des macro-agrégats stables. La comparaison entre les sols S2 et S7 illustre clairement ce constat. Ces deux sols présentent des fractions granulométriques très comparables et de faibles teneurs en SH. Le sol S7 est plus riche en COT que S2 et la teneur en COP du sol S7 est trois fois celle de S2. Cette situation s'est reflétée sur le comportement de ces deux sols

**Figure 9** - Les différences d'aspects entre (a) un macro-agrégat de sol riche en fraction fine (ensemble de micro-agrégats) et (b) un macro-agrégat d'un sol riche en sable et POM.

**Figure 9** - Differences between (a) macro-aggregate of soil with high content of clay and (b) macro-aggregate of soil with high content of sand.



vis-à-vis du stress hydrique. En effet, le sol S7 est largement plus stable et présente des pourcentages nettement plus élevés en macro-agrégats par rapport à S2. D'un autre côté, les faibles teneurs en SH enregistrés n'ont pas permis l'édification des liaisons argilo-humiques dans S2 et S7 qui (SH) ne jouent qu'un rôle secondaire, à l'inverse de leur rôle dans les sols à texture fine ou limoneuse (Annabi *et al.*, 2007; Piccolo and Mbagwu, 1999).

De plus, dans son travail, Caravaca *et al.* (2004), a montré que la stabilité des macro-agrégats (0,2-4 mm) n'est pas contrôlée par la fraction fine de la matière organique associée à la fraction minérale fine (< 0,02 mm) des sols riches en sables. Ce ne sont pas des liaisons énergétiques qui édifient ces agrégats. Les macro-agrégats sont formés, non pas principalement par l'association des micro-agrégats comme dans le cas des sols à texture fine, mais par l'emprisonnement des particules des sols dans un tissu formé par de la matière orga-

nique particulaire de différentes tailles colonisée par les micro-organismes, qui à leur tour piègent les grains de sables et de limons (*figure 9*). En effet, autour de cette fraction particulière se développe une activité de décomposition très intense assurée en particulier par les champignons. Ces microorganismes sont connus par leurs actions efficaces dans la stabilisation des agrégats car (i) ils sécrètent des substances agrégeantes à fort pouvoir collant (Molope *et al.*, 1987), (ii) leurs mycéliums consolident également directement la structure du sol par enchevêtrement mécanique des particules minérales entre les hyphes et/ou par la résistance mécanique des filaments fongiques aux contraintes physiques (Degens, 1997), (iii) ils diminuent la mouillabilité des agrégats (Smits *et al.*, 2003). Ces actions sont de plus importantes dans les sols sableux (Oades, 1993). Dans ce travail, nous n'avons pas réalisé des analyses sur la biomasse fongique. Toutefois, on peut considérer que les champignons ont contribué à l'édification et la stabilisation des agrégats puisque la population fongique est généralement majoritaire dans les sols (Six *et al.*, 2006).

Le modèle d'agrégation ainsi présenté dans la *figure 9* n'adopte pas la définition, couramment utilisée, qu'un macro-agrégat est l'assemblage d'un ensemble de micro-agrégats. Selon ce modèle, l'activité biologique et la fraction particulaire sont à l'origine de la formation d'un agrégat de taille importante où est emprisonnée la fraction minérale essentiellement sableuse. La stabilité de la structure est autant préservée que l'apport en COP est continu et l'action des facteurs déstabilisant est limitée. Ces agrégats seront par ailleurs caractérisés par une porosité importante de type macro engendrée par les vides créés entre les grains de sable. Ceci permettra le développement des racines (un autre type de COP) qui vont profiter d'une bonne circulation de l'eau et des gaz et qui à leur tour vont assurer une fixation de plus de la fraction minérale.

Par contre, la destruction de ces types d'agrégat va engendrer un effondrement de la structure et la libération totale des grains de sables et de la matière organique particulaire. Si cette situation n'est pas récupérée les conséquences seront incontestablement graves pour les sols, en particulier en ce qui concerne la destruction de la porosité du sol, l'érosion et l'accélération de la minéralisation de la matière organique par sa mise à la disposition des activités de biodégradation.

## CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif de mettre en évidence le rôle des matières organiques dans la stabilisation des sols à textures riches en sables dans différentes régions de la Tunisie. Ces terres supportent à la fois une activité agricole intense et des conditions climatiques très sévères et elles risquent des formes de dégradation multiples liées à l'instabilité de la structure de leurs horizons de surface.

A la lumière de ces résultats, on remarque que les teneurs variables de la matière organique sont principalement liées au mode d'occupation des sols. Tous les sols sont stables à sec, une stabilité qui semble indépendante de la teneur et de la nature de la fraction organique.

En revanche, lors de l'application d'un traitement d'humectation, les sols se comportent différemment en fonction de leurs richesses en fractions organiques. Le processus le plus destructif est l'humectation rapide et les sols les plus riches en matière organique sont les plus stables. De plus, les tests statistiques ont montré une association très hautement significative entre la stabilité et principalement la fraction organique particulaire. Un rôle indirect de cette fraction lié à l'activité biologique qui la décompose. Ensemble matière organique particulaire et activité biologique (hyphes mycéliens, sécrétions...) forment un enchevêtrement où sont piégés les grains de sables et le reste des particules des sols conduisant ainsi à l'édification des macro-agrégats. Ces macro-agrégats sont stables lors d'une humectation brutale.

Enfin, il faut toutefois signaler qu'une meilleure stabilité structurale de ces sols engendre non seulement le ralentissement des phénomènes de dégradation des terres des zones arides, mais réduit la minéralisation de la matière organique qui se trouve protégée dans les agrégats. Un processus qui favorise davantage la séquestration du carbone organique des sols des zones arides et ainsi ratifie la fonction puits envers les gaz à effet de serre. Cependant, une étude plus générale et utilisant un nombre plus important d'échantillons des sols avec différents usages et sur lesquels on réalise des photos en loupe ou en microscope, est envisagée.

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont au Dr Frédéric Darboux de l'INRA Orléans (France) pour son aide dans la réalisation des mesures de la stabilité des agrégats et au Dr Mohamed Annabi de IN-RAT (Tunisie) pour son aide dans la réalisation des mesures des substances humiques.

## BIBLIOGRAPHIE

- Annabi M., Houot H., Francou F., Poitrenaud M. et Le Bissonnais Y., 2007 - Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal*, 71, (2), pp. 413-423.
- Anne P., 1945-Dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. Agron.* 15 (2), pp. 161-172.
- Ashagrie Y., Zech W., Guggenberger G. et Mamo T., 2007 - Soil aggregation and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia. *Soil and Tillage Research*, 94, pp. 101-108.
- Barthès B. G., Kouakoua K., Larré-Larrouy M.C., Razafimblo T.M., De Luca E.F., Azontonde A., Neves C.S.V.J., De Freitas P.L. et Feller C.L., 2008 - Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma*, pp. 143, 14-25.
- Bongiovanni M.D. et Lobartini J.C., 2006 - Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro- and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma*, pp. 136, 660-665.
- Bouajila A., 2009 - Rôle de la matière organique dans la stabilité structurale et l'évolution du système poral: applications à quelques types de sols de Tunisie. Thèse de doctorat: Université El Manar Tunis (Tunisie).
- Brahim N., 2011 - Réchauffement climatique et vulnérabilité des sols méditerranéens: spatialisation et séquestration du carbone en Tunisie. Thèse de doctorat: Université El Manar, Tunis (Tunisie).
- Bronick C.J. et Lal R., 2005 - Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, pp. 3-22.
- Cambardella C.A., Elliott E.T., 1993 - Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma* 56, 449-457.
- Canton Y., Solé-Benet, Asencio C., Chamizo S. et Puigdefabregas J., 2009 - Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with run off and erosion. *Catena*, 77, pp. 192-199.
- Caravaca F., Lax A. et Albaladejo J., 2004 - Aggregate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain. *Soil and Tillage Research*, 78, (1) pp. 83-90.
- Chan K.Y., 2001 - Soil particulate organic carbon under different land use and management *Soil Use and Management*, 17, pp. 217-221
- Chenu C., Le Bissonnais Y. et Arrouays D., 2000 - Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, pp. 64, 1479-1486.
- Chenu C., Abiven S., Annabi M., Barray S., Bertrand M., Bureau F., Cosentino D., Darboux F., Duval O., Fourrié L., Francou C., Houot S., Jolivet C., Laval K., Le Bissonnais Y., Lemée L., Menasseri S., Pétraud J.P. et Verbèque B., 2011 - Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 18, (3), pp. 161-174.
- Degens B.P., 1997 - Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Aust. J. Soil. Res.*, 35, pp. 431-459.
- Dubois M., et Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. et Smith F., 1956 - Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.*, 28, pp. 350-356.
- Francou C., 2003 - Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d'indicateurs pertinents. Thèse de doctorat: Institut National Agronomique Paris-Grignon (France).
- Fryrear D.W., Krammes C.A., Williamson D.L. et Zobeck T.M., 1994 - Computing the winderosion fraction of soils. *Soil Water Conserv.* 49, pp. 183-188.
- Garcia-Pausas J., Casals P. et Romanya J., 2004 - Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer. *Soil Biology & Biochemistry*, 36, 6, pp. 989-99.
- Gisi U., 1997 - *Bodenökologie*. 2. neuüberarbeitete und erweiterte Auflage. ThiemeVerlag, Stuttgart, NY.
- Haynes R.J. et Francis G.S., 1993 - Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *J. Soil Sci.*, 4, pp. 665- 675.
- Hevia G.G., Mendez M. et Buschiazio D. E., 2007 - Tillage affects soil aggregation parameters linked with wind erosion. *Geoderma*, 140, pp. 90-96.
- Jastrow J.D. et Miller R.M., 1997 - Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. *In* Lal, R., Kimble, J., Follett, R., Stewart, B. (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 207-223.
- Le Bissonnais Y., 1996 - Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.*, 47, pp. 425-437.

- Li X.G., Li F.M., Zed R., Zhan Z.Y. et Singh B., 2007 - Soil physical properties and their relations to organic carbon pools as affected by land use in an alpine pastureland. *Geoderma*, 139, pp. 98-105.
- Molope M.B., Grieve I.C., Page E.R., 1987 - Contribution by fungi and bacteria to aggregate stability of cultivated soils. *J. Soil Sci.*, 38: pp. 71-77.
- Monnier G., 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 16, pp. 327-400.
- Oades J.M., 1984 - Soil organic matter and structural stability mechanisms and implications for management. *Plant & Soil*. 76, pp. 319-337.
- Oades J.M., 1993 - The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56: pp. 377-400.
- Piccolo A. et Mbagwu J.S.C., 1999 - Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, pp. 1801-1810.
- Pikul J.L., Osborne Jr., Ellsberry C. et Riedell W., 2007 - Particulate organic matter and water stable aggregation of soils under contrasting management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, pp. 766-776.
- Puget P., Chenu C., et Balesdent J., 1995 - Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 46, pp. 449-459
- Roose E., Arabi M., Brahamu K., Chebbani R., Mazour M. et Morsli B., 1993 - Erosion en nappe et ruissellement en montagne algérienne. *Cahier ORSTOM Pédol.* 28, Z: pp. 289-308.
- Saber N., et Mrabet R., 2002 - Influence du travail du sol et des rotations de cultures sur la qualité d'un sol argileux gonflant en milieu semi-aride marocain. *Etude et gestion des sols*, 9, pp. 43-53.
- Schaefer M. et Schauerer J., 1990 - The soil fauna of beech forests: comparison between a mull and a moder soil. *Pedobiologia* 34, pp. 299-314.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S. et Deneff K., 2004 - A history on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 79, pp. 7-31.
- Six J., Frey S.D., Thiet R.K., and Batten. K.M., 2006 - Bacterial and fungal contribution to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, pp. 555-569
- Smits T.H.M., Wick L.Y., Harms H., Keel C., 2003 - Characterization of the surface hydrophobicity of filamentous fungi. *Environmental Microbiology*, 5: pp. 85-91.
- Wright A.L. et Hons F.M., 2004 - Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, pp. 507-513
- Youker R.E. et McGuinness J.L., 1956 - A short method of obtaining mean weight-diameter values of aggregate analysis of soils. *Soil Sci.*, 83, pp. 291-294.