

# Évaluation quantitative et rôles de la matière organique dans les sols cultivés en zones subhumides et semi-arides méditerranéennes de la Tunisie

H. BEN HASSINE<sup>1\*</sup>, T. ALOUI<sup>1</sup>, T. GALLALI<sup>2</sup>, T. BOUZID<sup>1</sup>, S. EL AMRI<sup>1</sup> et R. BEN HASSEN<sup>1</sup>

**RÉSUMÉ** - H. Ben Hassine, T. Aloui, T. Gallali, T. Bouzid, S. El Amri et R. Ben Hassen. **Évaluation quantitative et rôles de la matière organique dans les sols cultivés en zones subhumides et semi-arides méditerranéennes de la Tunisie.** *Agrosolutions* 19 (2) : 4-17. Dans le but d'effectuer un diagnostic général des réserves en matière organique des sols céréaliers du Nord-Ouest de la Tunisie et d'évaluer leur rôle dans l'échange de cations et dans la fixation de P et de K, une vingtaine de points représentant les différents types pédogénétiques de ces sols ont été échantillonnés à deux niveaux dans les 40 centimètres supérieurs. Pour déterminer les concentrations en matière organique, trois méthodes d'analyse ont été utilisées. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer les taux de conversion du C organique en teneurs en matière organique totale pour ces sols, taux qui se sont avérés plus élevés que la valeur de 1,724, fréquemment utilisée dans les laboratoires pour effectuer cette conversion. En effet, la méthode de perte de poids a fourni des valeurs légèrement plus élevées par rapport aux deux autres méthodes utilisées. Cette triple analyse a aussi permis d'établir à 87 % le coefficient d'extraction du C organique par la méthode Walkley & Black par rapport à la méthode Anne.

Les teneurs en matière organique des sols étudiés sont généralement faibles, mais ceux-ci ne sont pas dans un état très appauvri comparativement à d'autres sols intensivement mis en culture de par le monde. Les retours de matière organique au sol en vue de reconstituer les réserves sont insuffisants, ce qui incite à chercher des solutions pour améliorer ces réserves. Par ailleurs, bien que fortement liée à la CEC, la matière organique ne participe que d'une manière limitée à l'échange de cations à cause de ses faibles teneurs. La majorité des processus d'échange sont assurés par la fraction minérale. La rétention en P et en K par cette matière organique est peu importante et est le reflet de l'insuffisance des réserves des sols.

**Mots-clés** : sols céréaliers, matière organique, méthodes d'analyse, CEC, phosphore, potassium

**ABSTRACT** - H. Ben Hassine, T. Aloui, T. Gallali, T. Bouzid, S. El Amri and R. Ben Hassen. **Quantitative assessment and parts of organic matter of cultivated soils in mediterranean subhumid and semi-arid zones of Tunisia.** *Agrosolutions* 19 (2): 4-17. In order to establish a general diagnostic on the organic matter contents of cereal soils from North-Western Tunisia and to assess their contribution to exchange and fixation of P and K, twenty samples representative of the different soil types of that region were collected from two levels in the upper 40cm. Soil organic matter contents were measured using three different analytical methods. Results obtained showed that conversion rates of organic C to organic matter for these soils were higher than the 1.724 value normally used in several laboratories. The weight-loss method showed, in effect, values slightly higher than those obtained from the two other tested methods. This comparison between the three methods also allowed to establish at 87%, the extraction coefficient of organic C by the Walkley & Black method by comparison to that calculated from the Ann method.

The organic matter contents measured in the studied soils are generally low but not impoverished in comparison to those of other intensively cultivated soils of the world. Actually, returns of organic residues to these soils are inadequate to maintain or improve their organic matter contents and solutions must be examined to correct such situation. Despite its links to CEC, organic matter plays a minor role in this property due to its low content; exchange processes being mainly ensured by the mineral fraction in these soils.

**Key-words**: cereal soils, organic matter, analysis methods, CEC, phosphorus, potassium

<sup>1</sup> École supérieure d'agriculture de Mograne, 1121 Tunisie

\*Auteur pour la correspondance : courriel : habibbenhassine2001@yahoo.fr

<sup>2</sup> Faculté des Sciences de Tunis, Département des sciences de la Terre, 2092 Tunis

## Introduction

La présence de matière organique dans les sols est à l'origine de l'apparition de propriétés physicochimiques favorisant le développement des végétaux cultivés ou naturels. L'augmentation de ses teneurs s'accompagne d'une amélioration de la structure, de la facilité de l'infiltration de l'eau, de l'accroissement de la capacité de rétention en eau, ainsi que du pouvoir de résistance à l'érosion (Leprun, 1988). En outre, avec ses propriétés colloïdales, son caractère de substance fixatrice d'éléments et son pouvoir de chélation, elle joue un rôle chimique important dans les sols : libération d'éléments nutritifs après minéralisation et augmentation de la capacité d'échange cationique. Elle joue aussi un rôle environnemental capital en participant à contrer le phénomène de désertification et en diminuant, lorsque ses teneurs augmentent dans les sols, le dégagement de gaz carbonique pouvant rejoindre l'atmosphère et accroître les quantités de gaz responsables de l'effet de serre (FAO, 2008). Au niveau agricole, sa présence contribue à une bonne nutrition des espèces cultivées, ce qui se traduit par l'augmentation des rendements et l'amélioration de la production.

Pour les sols céréaliers du Nord-Ouest de la Tunisie issus pour la plupart des débris d'altération de roches sédimentaires carbonatées (marnes, calcaires, argiles) et cultivés sous régime pluvial pour produire une culture stratégique, ils sont soumis à des conditions favorisant la minéralisation de la matière organique étant donné qu'ils subissent une série de façons superficielles allant du labour profond de printemps ou d'été, au déchaumage, jusqu'aux divers recroisements précédant le semis. Ce travail du sol relativement intensifié est la cause de la chute des teneurs en matière organique comme l'ont constaté divers auteurs (Cerri, 1988; Arrouays et coll., 1994; Le Villio et coll., 2001; FAO, 2008; Alvaro-Fuentes et coll., 2008). Ainsi, le rythme relativement intensif de mise en culture, accompagné de façon quasi-permanente d'une fertilisation minérale phosphatée et azotée, est à l'origine de la diminution des teneurs en matière organique suite à une stimulation de l'activité microbienne (N'Dayegamiye, 1995). Les conditions de

climat semi-aride constituent encore une contrainte pour l'obtention de hauts rendements pouvant régénérer même partiellement les pertes annuelles par minéralisation. Même si ces sols étaient actuellement dans un état d'équilibre dans lequel les pertes seraient remplacées par la décomposition sur place des racines, des chaumes et des autres résidus de récolte, le milieu reste fragile et exposé à la dégradation surtout par attaque érosive. La matière organique ancienne et stable peut ainsi se dégrader suite à l'apparition de tels facteurs d'instabilité (Dabin, 1976). La faiblesse des renouvellements au cours des années de jachères ou de basses productions aggrave encore le problème

La grande utilité de la matière organique pour ces types de sols destinés presque exclusivement à la monoculture d'espèces annuelles céréalières, nous a poussé à réaliser un travail de diagnostic et d'évaluation de l'état de cette matière organique. Ce travail est devenu nécessaire pour répondre aux questions suivantes : quelles seraient les teneurs actuelles de ces sols en matière organique et comment varieraient-elles en fonction des types de sols et des régions? Auraient-elles atteint des seuils dangereux pouvant déclencher les processus de dégradation que Duchaufour (1991) situe autour de 2%? Ce travail de diagnostic peut aussi offrir l'occasion de comparer diverses méthodes d'analyse de cette matière organique, évaluer leurs degrés de dépendance et déterminer les coefficients qui les lient. Il peut aussi conduire à juger le rôle de cette matière organique en tant que colloïde échangeur de cations d'abord, puis à apprécier sa capacité de mobilisation et de fixation de certains éléments, comme le phosphore apporté par fertilisation, et le potassium très abondant sur les colloïdes minéraux (Ben Hassine et coll., 2005).

## Matériel et méthodes

### Prélèvement des échantillons de sols

Une vingtaine de points de prélèvement ont été répartis sur les différentes régions productrices de céréales en fonction des types de sols les plus répandus qui s'y trouvent :

sols peu évolués d'apport (typic xerorthents), sols calcimagnésiques (calcixerollic ou vertic xerochrepts), vertisols (typic chromoxererts) et sols isohumiques (typic calcixerolls). On n'a pas tenu compte des sols érodés et de ceux situés sur des formes de modelé défavorisant l'obtention de bonnes productions. Tous les sols échantillonnés sont situés soit dans des plaines alluviales ou continentales, soit sur des unités géomorphologiques à faible pente et à relief peu accidenté. Le prélèvement a concerné les couches de sols de surface puisque ce sont celles qui doivent présenter les plus fortes teneurs en matière organique dans ces zones cultivées. Ainsi, dans chaque point, deux échantillons représentant les tranches de sol de 0 à 20 cm et de 20 à 40 cm ont été prélevés. Au total, 40 échantillons ont été rassemblés (figure 1). Ils ont pris les symboles suivants en fonction des lieux où ils ont été prélevés :



Figure 1. Localisation des points de prélèvement sur la carte administrative de la Tunisie.

- Région de Zaghouan : Za1, Za2, Za3, Za4.
- Région de Siliana : Si1, Si2, Si3, Si4, Si5.
- Région du Kef : Ke1, Ke2, Ke3, Ke4, Ke5.
- Région de Jendouba : Je1, Je2.
- Région de Béja : Bj1, Bj2, Bj3, Bj4.

Si on répartit ces points de prélèvement en fonction des types de sols, on obtient la distribution suivante :

- Sols peu évolués d'apport : PE-Za1, PE-Za4, PE-Si4, PE-Ke1, PE-Ke2, PE-Je1, PE-Je2, PE-Bj4.
- Sols calcimagnésiques : CM-Za2, CM-Za3, CM-Si1, CM-Si3, CM-Ke5, CM-Bj3.
- Vertisols : VE-Si2, VE-Si5, VE-Bj1, VE-Bj2.
- Sols isohumiques : IH-Ke3, IH-Ke4.

### Méthodes d'analyse

L'étude de la matière organique doit comprendre d'autres paramètres dont elle peut dépendre, étant donné qu'elle peut agir directement ou indirectement sur leur présence dans les sols. Il a donc été jugé utile pour cette étude de déterminer les variables suivantes : argile, capacité d'échange cationique (CEC), phosphore assimilable (Olsen), potassium échangeable et calcaire. Pour la matière organique, trois méthodes différentes ont été employées (Anne, perte de poids et Walkley & Black) afin de mener une évaluation comparative entre leurs différents résultats et d'introduire dans les laboratoires une nouvelle méthode moins consommatrice de produits d'analyse souvent indisponibles sur le marché local.

Avant leur analyse, les échantillons ont été séchés à l'air libre puis tamisés à 2 mm.

**Matière organique par la méthode Anne** : extraction du carbone à chaud par le bichromate de potassium en milieu sulfurique. Dosage de l'excès de bichromate par une solution de sel de Mohr et détermination par différence du volume ayant réagi avec le carbone du sol (Naânaâ et Susini, 1988).

**Matière organique par la méthode de perte de poids** : incinération à 375°C de 5 g de sol durant 16 heures (Moreno et coll., 2001). Détermination du taux de matière organique par le rapport de la différence entre le poids du sol sec et le poids du sol incinéré (\*100) sur le poids du sol sec; le poids du sol sec est obtenu par séchage à l'étuve durant 24 heures à 105°C.

**Matière organique par la méthode Walkley & Black** : l'extraction du carbone est effectuée comme la méthode Anne au bichromate de potassium en milieu sulfurique mais à froid. Le dosage du carbone extrait est réalisé par colorimétrie (couleur verte des ions Cr trivalents) à 590-600 nm.

**La capacité d'échange cationique (CEC)** : extraction de 10 g de sol par une solution normale d'acétate d'ammonium à pH = 8,2, lavage à l'alcool puis une seconde percolation par une solution de NaCl à 10 %. Les ions  $\text{NH}_4^+$  déplacés sont entraînés par la vapeur, recueillis dans une solution d'acide borique à 2 % puis titrés par HCl 0,01 N. La quantité de  $\text{NH}_4^+$  exprimée en meq/100g représente la CEC.

**Le potassium échangeable** : dosé par photométrie de flamme dans l'extrait à l'acétate d'ammonium 1 N à pH = 8,2. Ce dosage nécessite des points de gamme préparés à partir d'une solution de KCl.

**Le phosphore assimilable (Olsen)** : extraction par une solution de  $\text{NaHCO}_3$  0,5 N ajustée à pH = 8,5 par la soude. Dosage colorimétrique à 660 nm de la couleur bleue développée par le complexe phosphomolybdique réduit par l'acide ascorbique.

**La teneur en argile** : attaque de 20 g de sol tamisé à 2 mm par  $\text{H}_2\text{O}_2$  à 110 v, dispersion à l'hexamétophosphate de Na, agitation et prélèvement à la pipette de Robinson de 10 ml de la suspension après environ 8 heures de décantation (loi de Stokes). Le pourcentage d'argile est calculé après séchage à l'étuve à 105°C et pesée de la charge solide contenue dans les 10 ml prélevés à la pipette de Robinson.

**Le calcaire total** : attaque de 0,5 g de sol par 15 ml de HCl 6N et mesure du volume de  $\text{CO}_2$  dégagé à l'aide du calcimètre Bernard. Détermination du pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  du sol après comparaison avec le volume de  $\text{CO}_2$  dégagé par 0,3 g de calcaire pur.

**Le calcaire actif** : attaque de 2,5 g de sol par 250 ml d'une solution 0,2 N d'oxalate d'ammonium et agitation. Titration de l'excès d'oxalate par une solution de permanganate de potassium 0,1 N et détermination par différence du volume d'oxalate ayant réagi avec le calcaire actif du sol. Calcul

du pourcentage de calcaire actif en utilisant l'équation d'équivalence entre les volumes et les normalités.

### Calculs statistiques

#### Moyennes et variances

**Les moyennes** : elles ont été calculées pour les rapports MO (pp)/C (Anne), MO (pp)/C (W & B) et C (Anne)/C (W & B). Le calcul a concerné la totalité des échantillons (40), les échantillons classés par couche de prélèvement (0-20 et 20-40 cm) et ceux rangés par type de sol. Les écarts-types des différentes moyennes ont été déterminés pour établir les intervalles de confiance des valeurs de ces rapports  $[m - \sigma/(n)^{1/2}, m + \sigma/(n)^{1/2}]$ .

**Les variances** : les valeurs de la variance ont servi pour accepter ou rejeter l'hypothèse confirmant ou infirmant les différences significatives des rapports MO (pp)/C (Anne) et MO (pp)/C (W & B) et prédire quelles sont les causes probables de ces différences si elles existent. Ainsi, le test Fischer-Snedecor et le test Student ont été utilisés pour l'étude comparative des variances des deux rapports (Ministère de la Coopération, 1974).

#### Régression linéaire simple et multiple

La régression linéaire simple a été employée pour dégager le degré de corrélation entre divers paramètres analysés pris deux à deux, dont les teneurs en C organique obtenues par les trois méthodes d'analyse. La régression multiple a été utilisée pour établir une équation liant les résultats des trois méthodes de l'analyse de la matière organique.

#### Analyse en composantes principales

Pour étudier la répartition spatiale des teneurs en matière organique et en fonction des autres paramètres étudiés, la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée en séparant entre les échantillons de surface (0-20 cm) et ceux de la tranche de sol suivante (20-40 cm). Les teneurs en matière organique sont exprimées par la moyenne des trois méthodes d'analyse. Cette procédure permet de

grouper et de répartir les variables et les types de sols avec leurs sites de prélèvement (tableau 1) autour des axes principaux facilitant ainsi l'observation d'éventuelles liaisons entre les variables et les endroits où elles sont le plus représentées.

## Résultats

### Teneurs des sols en matière organique

La matière organique déterminée par la méthode de perte de poids présente des valeurs variant entre 1 et 3 %. Les valeurs

les plus élevées sont observées dans des vertisols : VE-Bj2 (0-20 cm) avec 3,07 % et VE-Si2 (0-20 cm) avec 2,81 % (tableau 1). Les valeurs les plus faibles concernent un sol calcimagnésique (CM-Ke5, 20-40 cm) avec 1,25 % et un sol peu évolué (PE-Je2, 20-40 cm) avec 1,43 %. La moyenne des 40 échantillons est de 2,11 % avec un

**Tableau 1. Résultats d'analyse des paramètres étudiés**

Région	Échantillons	Carbone organique% (méthode Anne)	MO % (méthode de perte de poids)	Carbone organique % (méthode Walkley & Black)	CEC meq/100 g	K <sub>2</sub> O échangeable meq/100 g	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> assimilable ppm	Argile %	CaCO <sub>3</sub> total %	CaCO <sub>3</sub> actif %
Zaghuan	PE-Za1 0-20	1,71	2,68	3,40	31	370	88	30,1	29,2	11,5
	PE-Za1 20-40	1,04	2,48	0,70	4,6	810	85	30,6	28,8	12,5
	CM-Za2 0-20	0,73	2,32	0,60	7,2	240	48	20,3	38,8	17,5
	CM-Za2 20-40	0,79	2,10	0,79	13	290	83	23,7	36	24
	CM-Za3 0-20	0,92	1,67	0,79	7,2	230	83	24,6	16,6	8,5
	CM-Za3 20-40	1,10	1,89	0,90	12,6	520	33	23,1	19,4	11,5
	PE-Za4 0-20	0,98	1,89	1,05	12,8	420	18	24,6	24,9	11,5
	PE-Za4 20-40	0,73	2,09	0,50	12,4	240	5	25,9	24	14,5
Siliaia	CM-Si1 0-20	0,92	2,11	0,55	15	420	15	18,2	33,7	22,5
	CM-Si1 20-40	1,10	2,31	0,79	22,4	360	20	25,6	31,2	21
	VE-Si2 0-20	1,22	2,81	1,10	31,6	200	33	11,1	41,7	20,5
	VE-Si2 20-40	1,04	2,79	0,95	31,2	190	28	31,9	41,2	20
	CM-Si3 0-20	0,67	1,82	2,30	6,6	460	25	34,5	45,6	20,5
	CM-Si3 20-40	0,55	1,63	1,30	6	90	43	40,9	44,4	25,5
	PE-Si4 0-20	0,79	1,90	0,75	13,6	400	65	30,1	34,5	15,5
	PE-Si4 20-40	0,85	1,86	0,70	13,4	430	30	34,3	31	15
	VE-Si5 0-20	0,98	2,30	0,75	19,4	550	60	32,4	36	17
	VE-Si5 20-40	0,85	2,10	0,75	17,2	230	43	24,6	36,6	19
Le Kef	PE-Ke1 0-20	1,10	2,78	0,70	23	410	38	15,9	47	22
	PE-Ke1 20-40	1,04	2,56	0,85	22	350	15	17,3	36	19,5
	PE-Ke2 0-20	1,10	2,54	0,55	18,8	300	25	22,4	45,1	24,5
	PE-Ke2 20-40	0,98	1,92	0,60	19	130	3	21,2	46	21,5
	IH-Ke3 0-20	1,16	2,50	0,65	20,8	410	28	23,7	8,1	6,5
	IH-Ke3 20-40	1,10	1,89	0,90	19,8	230	25	38,4	9,1	7
	IH-Ke4 0-20	1,04	1,82	0,70	9,4	110	25	29,1	8,6	6,5
	IH-Ke4 20-40	0,85	1,86	1,05	9	180	25	21,1	21,4	17,5
	CM-Ke5 0-20	0,79	1,64	0,65	11,8	270	30	35,8	19,6	6
	CM-Ke5 20-40	0,55	1,25	0,85	10,2	330	45	39,5	18,2	6
Jendouba	PE-Je1 0-20	0,73	2,09	0,85	14,2	470	88	30,6	15,8	11
	PE-Je 20-40	0,67	1,91	0,60	13,8	280	10	26,1	16,5	12,5
	PE-Je2 0-20	0,73	1,67	0,75	9,2	550	78	22,7	38,8	17,5
	PE-Je2 20-40	0,37	1,43	0,70	10,8	240	25	20,1	19,4	5
Béja	VE-Bj1 0-20	0,67	1,70	0,70	13,2	190	60	32,8	25,4	11,5
	VE-Bj1 20-40	0,55	1,69	1,30	12,4	310	65	32,8	26,4	14,5
	VE-Bj2 0-20	1,65	3,07	1,05	35,2	720	108	35,6	19,6	10,5
	VE-Bj2 20-40	1,41	2,34	0,70	36,8	290	85	32,4	21,1	12,5
	CM-Bj3 0-20	1,04	2,05	1,00	13,4	300	48	26,4	58	23
	CM-Bj3 20-40	0,73	2,5	1,00	12,4	180	53	25,8	59	24
	PE-Bj4 0-20	0,98	2,08	0,85	13,4	370	60	21,8	22,4	11,5
	PE-Bj4 20-40	1,10	2,29		14,4			30	24,2	14,6

écart-type de 0,41. Les valeurs de l'horizon de surface (0-20 cm) sont plus élevées pour 14 points de prélèvement sur un total de 20. Les points où la situation est inversée appartiennent à trois sols calcimagnésiques (Za3, Si1 et Bj3), deux sols peu évolués (Za4 et Bj4) et un sol isohumique (Ke4). Ainsi, malgré le travail du sol qui expose l'horizon de surface à plus de minéralisation de la matière organique, celle-ci semble plus séquestrée dans cet horizon qui reçoit le maximum de déchets et de sous-produits de récolte (racines et chaumes en particulier). En effet, en comparant les moyennes en matière organique des deux niveaux de prélèvement, il s'avère que celle du niveau de surface (0-20 cm) est plus élevée : 2,17 (0-20 cm) > 2,04 (20-40 cm). Il en est de même pour la somme des taux de matière organique des deux tranches de sol : 43,44 (0-20 cm) > 40,89 (20-40 cm). Ceci est aussi vrai pour les teneurs en carbone organique déterminées par analyse chimique.

Pour les deux autres méthodes de dosage chimique (méthode Anne et méthode Walkley & Black), les valeurs sont exprimées en C organique (tableau 1) pour éviter l'utilisation de coefficients de transformation très variables en fonction des milieux et des types d'humus.

Les valeurs en C organique obtenues selon la méthode Anne sont comprises entre 0,67 % (CM-Si3 et VE-Bj1) et 1,71 % (PE-Za1) pour l'horizon 0-20 cm. Pour l'horizon suivant, les teneurs en C organique varient entre 0,55 % (CM-Si3, CM-Ke5 et VE-Bj1) et 1,41 % (VE-Bj2).

Pour les taux de C organique évalués par la méthode Walkley & Black, ils évoluent entre 0,55 % (CM-Si1 et PE-Ke2) et 3,4 % (PE-Za1) pour l'horizon de surface; les teneurs de l'horizon 20-40 cm se distribuent entre 0,5 % (PE-Za4) et 1,3 % (CM-Si3 et VE-Bj1). Il s'avère d'après ces résultats que :

- Les vertisols (VE-Si2, VE-Si5 et VE-Bj2) et le sol peu évolué noirci ou tirsifié (PE-Za1) sont plus enrichis en matière organique. Ces sols sont relativement riches en argile qui stabiliserait mieux la matière organique en lui assurant une protection qui la mettrait plus à l'abri de

la forte activité minéralisatrice à laquelle s'exposent les horizons de surface des sols cultivés (Albrecht, 1988).

- Les sols peu évolués (PE-Za4, PE-Si4 et PE-Je2), les sols calcimagnésiques (CM-Za3 et CM-Ke5), le vertisol (VE-Bj1) et les sols isohumiques (IH-Ke3 et IH-Ke4) présentent des teneurs plus faibles en matière organique. La faible teneur de la matière organique des sols n'est par conséquent pas spécifique à la classe pédogénétique comme c'est le cas pour les plus fortes teneurs qui ne caractérisent que des sols montrant des signes de vertisolisation.

### Variation des rapports matière organique/C organique

Afin d'évaluer la relation entre le C organique et la matière organique totale des sols étudiés et de vérifier le coefficient 1,724 couramment employé pour transformer les résultats des analyses chimiques en matière organique, on a procédé aux calculs des rapports MO par combustion sèche (MO (pp)) aux valeurs de C organique obtenues par les méthodes Anne (C (Anne)) et Walkley & Black (C (W & B)).

Le rapport MO pp/C (Anne) présente une moyenne des 40 échantillons analysés de 2,36 avec un écart-type de 0,51, ce qui donne un intervalle de confiance compris entre 1,85 et 2,87. La moyenne du même rapport dans l'horizon 0-20 cm est de 2,25 avec un écart-type de 0,39. Dans l'horizon 20-40 cm, cette moyenne est de 2,48 avec un écart-type de 0,59. La moyenne du rapport MO pp/C (W & B) est de 2,63 et son écart-type est de 0,9, ceci fait un intervalle de confiance compris entre 1,73 et 3,53. Pour l'horizon 0-20 cm, la moyenne de ce rapport est de 2,68 et son écart-type est de 1; dans l'horizon 20-40 cm, elle est de 2,58 avec un écart-type de 0,8.

Les valeurs ainsi obtenues pour convertir le carbone organique en matière organique semblent plus élevées dans les deux cas que le coefficient de 1,724 est employé pour évaluer les teneurs en matière organique. Une telle différence serait probablement due à ce que la température de 105 °C pendant 24 heures aurait été insuffisante pour chasser la totalité de l'eau hygroscopique. En effet, Moreno et coll. (2001) ont

suggéré le séchage des échantillons à 150 °C à l'étuve pendant 24 heures pour obtenir les poids secs dans cette méthode.

### Variation des rapports matière organique (pp)/C organique en fonction des types de sols

La répartition de ces rapports en fonction des types de sols est illustrée à la figure 2 pour le rapport MO (pp)/C (Anne) et à la figure 3 pour le rapport MO (pp)/C (W & B). Chacune des deux figures comporte trois graphiques relatifs à la totalité des échantillons (0-40 cm), les échantillons de l'horizon 0-20 cm et ceux de l'horizon 20-40 cm.

Pour le rapport MO (pp)/C (Anne), les valeurs sont relativement élevées et presque toujours supérieures à 2 pour les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques et les vertisols dans les trois situations. Pour les sols isohumiques, la valeur tend à diminuer pour atteindre ou même descendre en

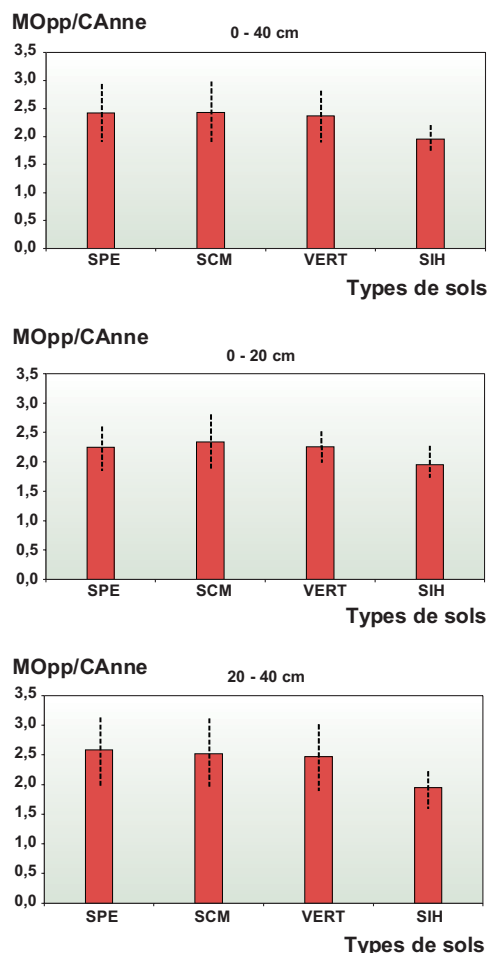


Figure 2. Évolution du rapport MO (pp)/C (Anne) en fonction des types de sols.

dessous de 2. L'évolution de ce rapport en fonction des horizons est presque identique puisque la droite liant les 4 points représentatifs des quatre types de sols présente une allure plus ou moins horizontale pour les trois premiers points, et chute nettement pour le quatrième point, en l'occurrence celui des sols isohumiques. Les écarts-types les plus élevés concernent les sols peu évolués et les sols calcimagnésiques, notamment pour l'horizon 20-40 cm. Les écarts-types les plus faibles concernent les sols isohumiques pour les trois situations.

Pour le rapport MO (pp)/C (W & B), les valeurs des moyennes se situent autour de 2,5 pour la totalité des échantillons, sauf pour les sols calcimagnésiques qui montrent un niveau légèrement plus bas de ce rapport. Dans le cas des échantillons de l'horizon de surface (0-20 cm), les valeurs sont proches de 2,5 pour les sols peu évolués et calcimagnésiques et ont tendance à

augmenter pour les vertisols et les sols isohumiques; pour ces derniers, la moyenne du rapport atteint ou dépasse 3. Pour l'horizon inférieur (20-40 cm), les moyennes ne sont pas identiques pour les quatre types de sols : de 3 environ pour les sols peu évolués, elle chute jusqu'à 2 pour les sols calcimagnésiques, puis remonte à 2,5 pour les vertisols, et diminue de nouveau jusqu'à moins de 2 pour les sols isohumiques. Les écarts-types ne sont pas stables et varient en fonction des types de sols et des profondeurs de prélèvement. Ils présentent des valeurs maximales pour les sols peu évolués et calcimagnésiques dans l'horizon 0-20 cm; leurs valeurs minimales sont observées dans l'horizon 0-20 cm des vertisols et dans l'horizon 20-40 cm des sols isohumiques.

Les valeurs obtenues des deux rapports semblent relativement éloignées du chiffre 1,724 utilisé pour transformer les taux du C organique analysé par voie chimique en teneurs en matière organique totale des sols et ce, pour les quatre types pédogénétiques retenus dans cette étude. En comparant les résultats des deux horizons, on ne voit pas d'énormes différences entre eux hormis les fluctuations constatées dans les valeurs relatives aux sols calcimagnésiques et isohumiques pour le rapport MO (pp)/C (W & B).

### Étude des variances des deux rapports MO (pp)/C Anne et MO (pp)/C (W & B)

**Comparaison des variances des deux rapports :** le test utilisé pour comparer les variances des deux rapports est celui de Fischer-Snedecor qui permet de calculer le rapport des variances des deux paramètres :  $d = s^2/s'^2 = 0,316$ . Ce chiffre est soumis à un domaine d'acceptation déterminé à partir des nombres de degrés de liberté (39 et 38) sur les tables à  $p = 5\%$ . Le rapport des variances 0,316 est situé en dehors du domaine d'acceptation qui est :  $[0,581; 1,72]$ . Les variances des deux rapports sont par conséquent différentes, ce qui laisse supposer que les modes d'extraction différents des deux méthodes d'analyse seraient responsables de l'apparition de ces dissimilitudes étant donné que le nombre divisé (MO (pp)) est le même et que les échantillons analysés sont aussi les mêmes.

**Comparaison entre les deux rapports par la méthode d'appariement :** les valeurs des deux rapports sont rangées en couples de valeurs pour chaque échantillon. On calcule à partir des carrés des écarts entre les différences et leurs moyennes  $(x_i - m)$  et avec le nombre  $n-1$  degrés de liberté un facteur  $s = [\sum (x_i - m)/k - 1]^{1/2}$ ; la valeur de ce facteur est  $s = 1,01$  qui permet de déterminer un coefficient  $(m/s)/(k)^{1/2}$  égal à 1,629. Ce coefficient est inférieur à la valeur « t » lue sur la table de Student, qui est de 2,025 à 38 degrés de liberté et à  $p = 0,05$ . Le test permet de conclure que l'hypothèse d'égalité des variables (les deux rapports) n'est pas fautive.

Les deux tests aboutissent à des conclusions différentes. On admet par conséquent que les différences proviennent probablement des échantillons appartenant à des types de sols et à des milieux écologiques différents.

### Variation des rapports C organique (Anne)/C organique (W & B)

Ce rapport est déterminé pour comparer les taux d'extraction du C organique par les méthodes Anne et Walkley & Black. La moyenne générale de 39 échantillons est de 1,15 avec un écart-type de 0,42. Ceci explique que la méthode Anne extrait en moyenne 15 % de plus de carbone que la méthode Walkley & Black ou, en d'autres termes, la méthode Walkley & Black extrait en moyenne 87 % du carbone traité à l'acide sulfurique à chaud selon la méthode Anne. Ce rapport ne reste pas stable sur les deux niveaux de prélèvement, il donne en effet les valeurs suivantes :

- Une moyenne de 1,20 avec un écart-type de 0,42 dans la tranche supérieure du sol (0-20 cm), ce qui signifie que la méthode Walkley & Black n'extrait que 83,3 % du carbone dissous par la méthode Anne.
- Une moyenne de 1,10 avec un écart-type de 0,43 pour les échantillons du niveau inférieur de prélèvement (20-40 cm), soit un taux d'extraction de la méthode Walkley & Black par rapport à la méthode Anne de 90,9 %.

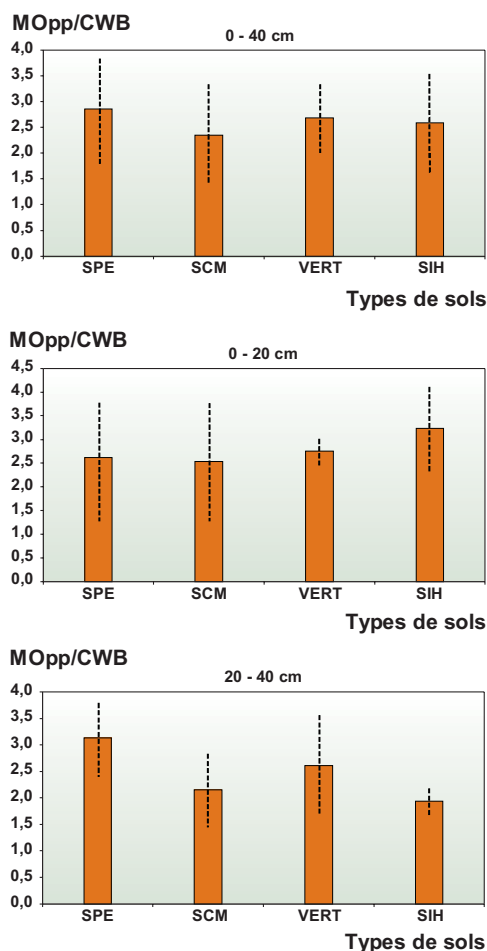


Figure 3. Évolution du rapport MO (pp)/C (W & B) en fonction des types de sols.

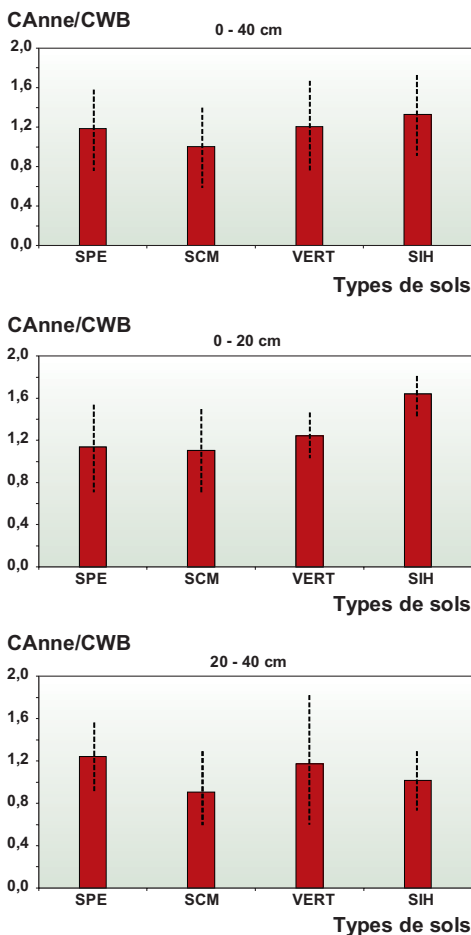


Figure 4. Évolution du rapport C (Anne)/C (W & B) en fonction des types de sols.

Répartie en fonction des types de sols, la moyenne ce rapport ne montre pas une variation homogène, mais ses valeurs ne s'éloignent pas du chiffre moyen 1,15, exception faite de l'horizon 0-20 cm des sols isohumiques où il augmente jusqu'à 1,64 (figure 4). On signale aussi la faible valeur de ce rapport pour les sols calcimagnésiques puisqu'il est égal à 1 pour la totalité des échantillons (0-20 cm) et à seulement 0,90 dans l'horizon 20-40 cm. Si pour le sol isohumique, la valeur élevée de ce rapport était probablement due au faible nombre d'échantillons (deux par horizon), celle des sols calcimagnésiques obtenue sur 12 échantillons (6 par horizon) expliquerait un rôle joué par le calcaire, en excès dans ces sols, pour faire plus ou moins équilibrer les taux d'extraction du C organique.

En général, le meilleur taux d'extraction du C organique par la méthode Anne est confirmé dans cette étude. Les chiffres obtenus varient entre 83,3 et 90,9 %, ce qui

représente des taux supérieurs à celui de 77 % communément connu comme pourcentage d'extraction du C organique atteint par la méthode Walkley & Black (ORSTOM, 1978).

### Les corrélations entre les résultats des trois méthodes d'analyse de la matière organique

#### Les régressions simples

Pris deux à deux, les résultats des trois méthodes d'analyse de la matière organique ont révélé les liens suivants (tableau 2) :

- La corrélation la plus étroite apparaît entre la méthode de perte de poids et la méthode Anne avec un coefficient de détermination égal à 0,532 et un coefficient de corrélation de 0,729 significatif au seuil 0,001. L'autre corrélation significative apparaît entre la méthode Anne et la méthode Walkley & Black avec un coefficient de corrélation  $r = 0,312$  qui est significatif au seuil 0,05. La corrélation entre la matière organique par perte de poids et le C organique (W & B) est non significative;
- Le faible seuil de probabilité 0,05 de la corrélation entre les deux méthodes de dosage chimique du carbone, en l'occurrence celles d'Anne et de Walkley & Black, montre que les marges d'erreurs expérimentales sont probablement élevées notamment pour le dosage colorimétrique

du carbone qui nécessite plusieurs manipulations et la lecture du résultat par rapport à une droite d'étalonnage.

#### La régression multiple

Cette opération vise à identifier la variable MO (pp) par l'utilisation simultanée des résultats des deux autres méthodes d'analyse pour ces types de sols caractérisés par leurs faibles réserves organiques, leur texture souvent fine et les renouvellements annuels insuffisants des matières humiques. L'équation recherchée n'a pu être obtenue à cause des faibles valeurs des coefficients de détermination. Seule l'équation suivante a pu être établie :

$$MO (Anne) = 0,5954 MO (pp) + 0,1326 MO (W \& B) + 0,1686$$

Son coefficient de détermination  $R^2$  est égal à 0,4902 et son coefficient de régression multiple est de 0,7002. L'existence d'une telle équation confirme les observations de la régression linéaire simple qui indiquent que le paramètre MO (Anne) est le seul à avoir des corrélations significatives avec les deux autres.

#### Variation spatiale des teneurs en matière organique en fonction des autres paramètres analysés

L'ensemble des paramètres analysés de chaque tranche de sol associés à la moyenne de la matière organique des trois

Tableau 2. Matrice des corrélations entre les résultats des trois méthodes d'analyse de la matière organique

	MO par perte de poids	CO (Anne)	CO (W & B)
MO par perte de poids	1	$R^2 = 0,531$ $r = 0,729$	$R^2 = 0,018$ $r = 0,134$
CO (Anne)	$R^2 = 0,531$ $r = 0,729$	1	$R^2 = 0,097$ $r = 0,312$
CO (W&B)	$R^2 = 0,018$ $r = 0,134$	$R^2 = 0,097$ $r = 0,312$	1

Tableau 3. Moyennes et écarts-types des variables de la tranche de sol 0-20 cm

Variables	Moyennes	Écarts-types
MO	1,867	0,5501
CEC	16,340	8,1191
K <sub>2</sub> O	369,500	141,3674
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	51,150	26,5260
A	26,135	6,6328
Cat	30,470	13,3085
Caa	14,775	5,8683

méthodes employées pour son évaluation ont été traités par une analyse en composantes principales.

### Résultats de l'ACP des échantillons de surface (0-20 cm)

Les moyennes des variables et leurs écarts-types (tableau 3) confirment les faibles teneurs en matière organique de ces sols et leur richesse en  $P_2O_5$  assimilable, en  $K_2O$  échangeable et en calcaire. La contribution des axes principaux à la variation totale

dans cette ACP est de 34,2 % pour l'axe 1, de 30,1 % pour l'axe 2 et de 15,4 % pour l'axe 3, ce qui fait un total de 79,7 %, valeur qui est relativement acceptable.

Sur le graphique de répartition des variables, on constate que l'axe 1 horizontal oppose deux groupes de variables : le calcaire total et actif correspondant aux échantillons PE-Ke1, PE-Ke2, CM-Bj3, CM-Si1 et CM-Za2; quant au phosphore assimilable et à l'argile, ils correspondent aux sites de VE-Bj2 et PE-Je1 (figure 5). La matière

organique est isolée par l'axe 2 et s'associe à la CEC pour apparaître en plus forte concentration dans le sol PE-Za1; ce point est opposé sur l'axe 2 aux points VE-Bj1, CM-Za3, CM-Ke5 et IH-Ke4 où les valeurs de cette matière organique et de la CEC ont été les plus faibles.

Au vu de cette répartition, on constate que les sols céréaliers du Nord-Ouest de la Tunisie ne s'agglomèrent pas ensemble, donc leurs propriétés ici étudiées sont très variables. Mais le résultat permet déjà de dégager le lien entre la MO et la CEC et aussi la faiblesse des réserves organiques dans certains de ces sols. Ces constats reflètent des modes de gestion différents (intensité du travail du sol, rotations, quantités de fertilisants différentes) et probablement aussi des constituants argileux de nature minéralogique différente, qui se répercutent inégalement sur l'état d'accumulation de la matière organique dans ces sols.

### Résultats de l'ACP des échantillons de la couche (20-40 cm)

Les moyennes des sept paramètres étudiés sont légèrement inférieures à celles de l'horizon supérieur. On note cependant un léger enrichissement en calcaire actif malgré une valeur presque stable du calcaire total. La matière organique a diminué de 0,2 %, ce qui reflète des réserves organiques plus élevées en surface malgré les conditions de minéralisation plus favorables (tableau 4).

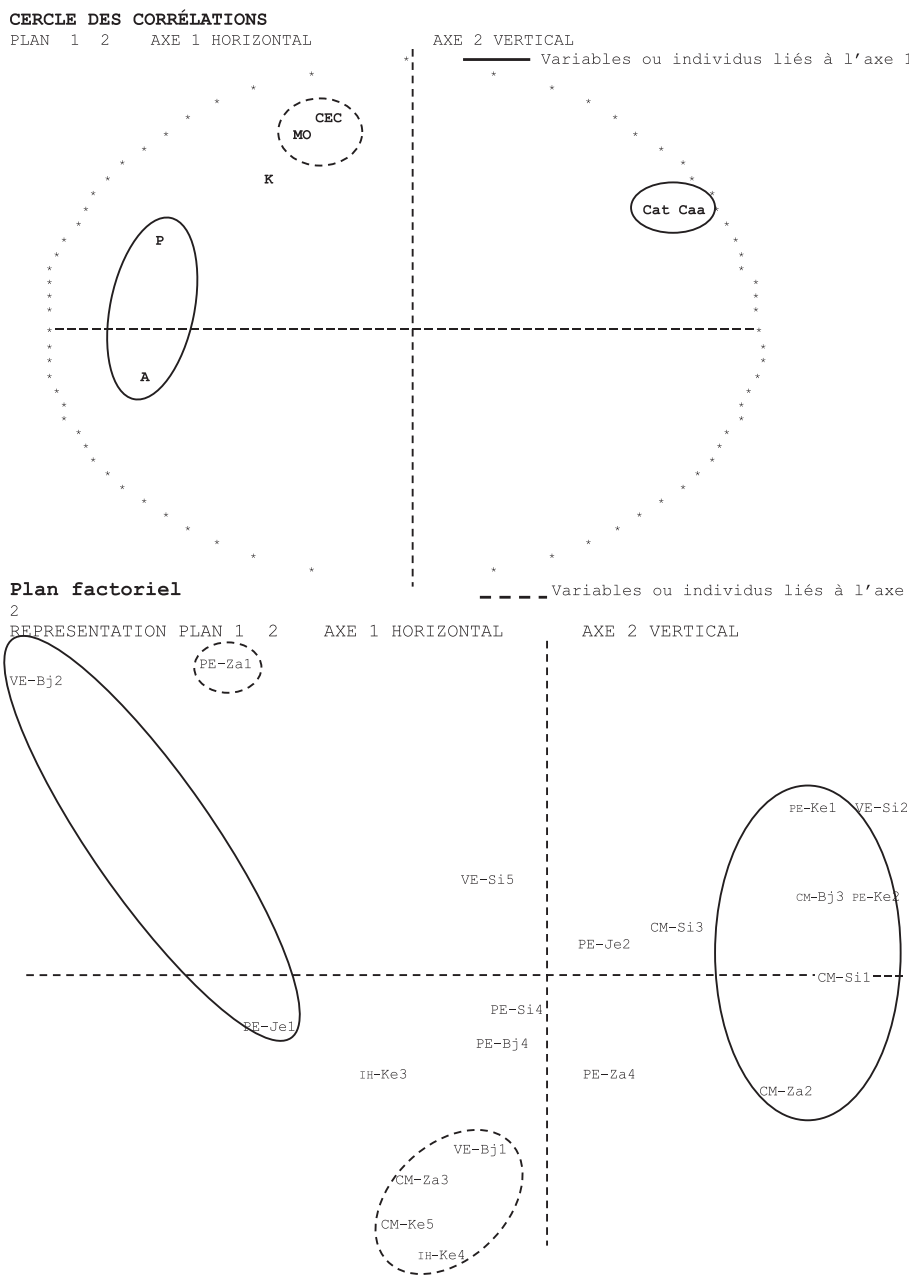


Figure 5. Cercle des corrélations des variables et plan factoriel de la répartition des sites de prélèvement (0-20 cm) autour des axes principaux.

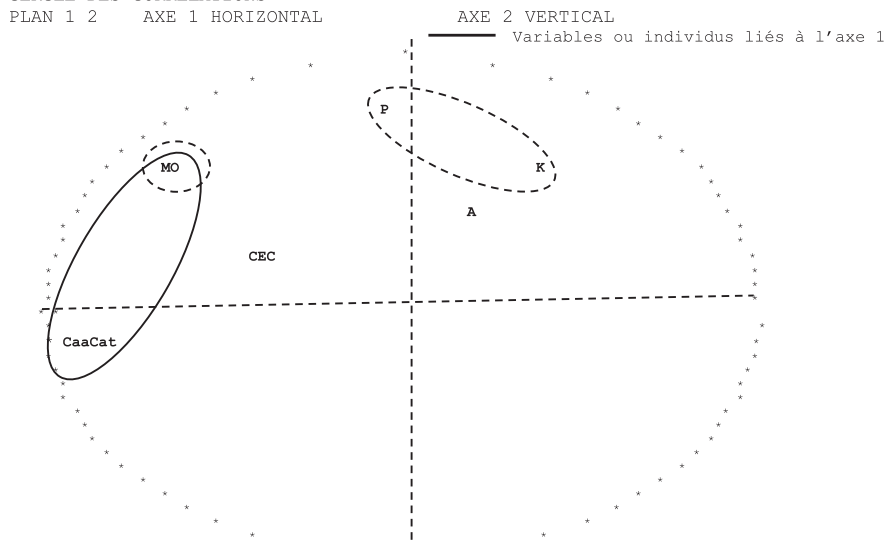
Tableau 4. Moyennes et écarts-types des variables de la tranche de sol 20-40 cm

Variables	Moyennes	Ecart-types
MO	1,653	0,2537
CEC	15,737	7,8636
$K_2O$	298,947	156,2688
$P_2O_5$	37,947	25,2805
A	28,174	6,7032
Cat	29,774	11,9943
Caa	15,947	5,9712

La contribution des axes à la variation totale est de 33,2 % pour l'axe 1, 23,3 % pour l'axe 2 et 17,9 % pour l'axe 3. Le total de la contribution des axes est de 74,4 %, valeur qui est plus faible que celle de l'horizon de surface. Sur l'axe 1 sont corrélées les variables MO, calcaire total et calcaire actif qui se projettent sur le plan



**CERCLE DES CORRÉLATIONS**  
PLAN 1 2 AXE 1 HORIZONTAL



**Plan factoriel**

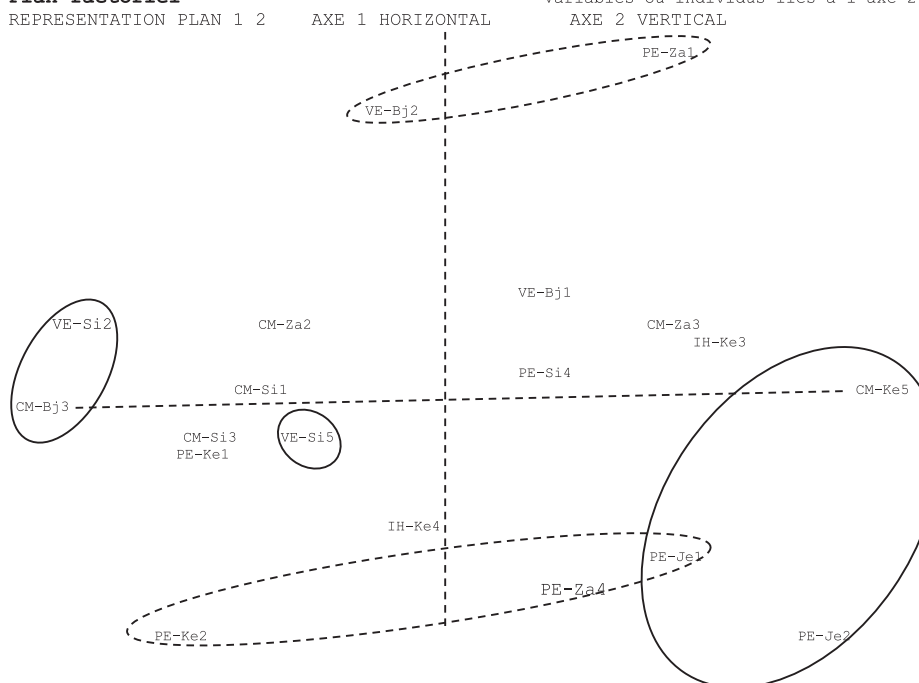


Figure 6. Cercle des corrélations des variables et plan factoriel de la répartition des sites de prélèvement (20-40 cm) autour des axes principaux.

factoriel des observations sur les sites VE-Si2 et CM-Bj3 (figure 6). Du côté opposé du même axe, se regroupent les sites CM-Ke5, PE-Je1 et PE-Je2, correspondant surtout à des sols peu évolués de la haute vallée de la Mejerda, moins riches en matière organique et en carbonates.

L'axe 2 isole du même côté les variables MO, P et K auxquelles correspondent les sols des points VE-Bj2 et PE-Za1 montrant le plus fort potentiel de fertilité de ces sols

puisque les trois paramètres en question favorisent la bonne production dans ces types de sols et pour cette catégorie de culture. À l'opposé, apparaissent les points PE-Ke2, PE-Za4 et PE-Je1 peu pourvus en MO, P et K, ce qui implique un faible potentiel de production dans cet horizon où peuvent se concentrer les racines des céréales et où l'eau de pluie peut être disponible puisqu'elle est moins sujette à l'évaporation. Il découle de cette analyse multivariée que :

- La matière organique est inégalement répartie en fonction des types de sols malgré des types de gestion qui diffèrent peu par l'intensité de la fertilisation minérale et de la production. Dans l'horizon de surface, elle ne se manifeste nettement que dans un seul type de sol (figure 5). Dans la partie opposée de l'axe, quatre types de sols se caractérisant par des teneurs inférieures à 2 % apparaissent (tableau 1). Le fait que seul un type de sol a été mis en évidence par les axes signifie que ces sols sont pour la plupart peu pourvus en matière organique et qu'une seule valeur émerge du lot : celle du sol peu évolué à caractère vertique (PE-Za1). Cette répartition n'est pas la même pour l'horizon suivant où les plus fortes réserves organiques sont dans les points VE-Si2 et CM-Bj3 (figure 6) qui correspondent à un vertisol lithomorphe et à un sol brun calcaire.
- Les liens de la matière organique avec les autres paramètres sont illustrés dans la couche 0-20 cm par le rapprochement avec la CEC (figure 5) et dans la couche 20-40 cm par le regroupement avec le calcaire actif et total (figure 6). Si la première constatation ne peut faire l'objet d'aucune controverse, puisque l'humus a toujours eu un rôle positif dans les processus d'échange de cations, la deuxième observation aurait pour cause l'effet inhibiteur du calcaire qui peut jouer un rôle de protection de la matière organique contre la minéralisation rapide, en formant une pellicule entourant la particule organique et empêchant les microorganismes de l'atteindre (Duchaufour, 1977).

**Rôle d'échange de la matière organique et ses relations avec les autres constituants des sols**

Les éléments essentiels de la nutrition végétale, et surtout céréalière, sont P, K et N, mais comme N est un élément à évolution rapide dans les sols et que ses teneurs peuvent varier au cours de courtes périodes, les déterminations analytiques n'ont concerné que les deux éléments plus statiques, en l'occurrence P et K, avec la capacité d'échange cationique ou CEC. L'objectif de ces déterminations analytiques est de chercher si la matière organique de ces sols et sous ce type particulier de gestion peut avoir un rôle dans les processus de fixation et d'échange de ces deux éléments P et K et

**Tableau 5. Résultats des tests de corrélation entre la matière organique en % et les autres paramètres analysés**

Paramètres mesurés	Nombre n de ddl*	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Coefficient de corrélation r	Équation	Seuil de signification
CEC (meq/100g)	40	0,4992	0,707	CEC = 13,728 MO - 13,002	p = 0,001
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> assimilable (ppm)	39	0,0306	0,175	-	NS
K <sub>2</sub> O échangeable (ppm)	39	0,0768	0,277	-	NS
Calcaire total (%)	40	0,081	0,285	-	NS
Calcaire actif (%)	40	0,1108	0,333	MO (pp) = 0,0231 calcaire actif + 1,7595	p = 0,05

\* ddl : degrés de liberté

aussi de voir son influence sur la variation de la CEC. La démarche suivie est celle de l'établissement de corrélations par la méthode de la simple régression linéaire entre ces trois paramètres et la matière organique déterminée par la méthode de perte de poids (tableau 5). En outre, comme le calcaire est un constituant qui agit sur l'évolution de la matière organique et la protégerait contre les dégradations microbiennes, une corrélation a été aussi établie entre ses teneurs dans ces sols et celles de la matière organique.

### La capacité d'échange cationique

La corrélation entre la matière organique (pp) et la capacité d'échange cationique (CEC) est hautement significative (tableau 5). La variation des valeurs de la matière organique explique 49,9 % de celle de la CEC. Le seuil de signification à n-2 degrés de liberté (ddl) est très haut avec un niveau de probabilité de 0,001, ce qui explique la forte dépendance de la CEC de la matière organique. Même si la participation de la matière organique à la capacité totale d'échange ne représente que seulement 4 meq/100g (en rappelant que l'humus se caractérise par une CEC de 200 meq/100g (Chamayou et Legros, 1989)), son rôle dans les processus d'échange de cations est prépondérant et devrait s'ajouter à celui de la matière minérale pour constituer ensemble une plus forte valeur de la CEC totale du sol. C'est ce qui a été déjà constaté par Bigorre et coll. (2000) qui ont établi une équation de la CEC en fonction de l'argile et de la matière organique et qui ont insisté sur le caractère additif des deux constituants. Il est à signaler que les valeurs de la CEC totale n'ont pas été fortement élevées et que la participation de la matière minérale (argiles) a été assez limitée pour de nombreux points. Y aurait-il un risque de voir une tendance vers l'illitisation des argiles par fixation du K provenant de la

décomposition des chaumes comme l'a constaté Boissezon (1988)?

### Le phosphore assimilable

Ce phosphore est extrait par le bicarbonate de Na peu concentré (Olsen) et il est exprimé en mg/kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Les sols étudiés reçoivent au début de chaque campagne agricole une fertilisation phosphatée qui renouvelle les réserves en P disponible, étant donné que les stocks accumulés au cours des campagnes précédentes devraient être épuisés par les récoltes et l'excès est rétrogradé en des formes insolubles en présence de fortes teneurs en calcaire. Les valeurs trouvées au cours de cette campagne d'évaluation effectuée au mois de février 2007, c'est-à-dire deux à trois mois après l'époque de fertilisation, sont importantes surtout dans l'horizon 0-20 cm. Il y a une légère tendance à la diminution dans l'horizon 20-40 cm avec certaines valeurs très faibles comme PE-Ke2 et PE-Za4 (tableau 1). Ce phosphore n'est pas fixé sur la matière organique qui peut offrir des sites de fixation pour cet élément se comportant comme anion en s'associant à l'oxygène (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). En effet, l'emploi de la méthode de la régression linéaire simple ne confirme aucun lien entre ces deux paramètres du fait des faibles valeurs des coefficients de corrélation obtenus (tableau 5). En fonction de ce résultat, on peut conclure que P-organique n'est pas très important dans ces sols; c'est ce qu'ont constaté Brossard et Laurent (1988) en indiquant que les cultures intensives conduisent à privilégier le stockage de P sous forme minérale.

Le phosphore dans ces sols serait disponible dans la solution puisque les dates de fertilisation sont récentes. Les sites minéraux d'échange situés essentiellement sur les bordures des argiles participeraient aussi à la fixation de cet

élément où il peut être échangé avec la solution. Mais les réserves aussi importantes soient-elles sont exposées à l'immobilisation par le cation Ca<sup>++</sup> pouvant être libéré par le calcaire très abondant dans ces sols.

### Le potassium échangeable

Le potassium échangeable évalué par la méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium est celui censé être fixé sur les sites d'échange présents sur les colloïdes minéraux et organiques. Il a été précédemment démontré (Ben Hassine et coll., 2005) que la matière organique évaluée par la méthode de Walkley & Black joue un rôle négligeable dans les mécanismes d'échange de cet élément, dont la majorité des sites de fixation seraient situés sur les argiles micacées. L'expérience est reprise dans cette étude pour confirmer ou infirmer les précédentes constatations tout en faisant varier les méthodes d'analyse de la matière organique. La recherche de liens entre les deux variables est réalisée par la méthode de la régression linéaire simple qui a donné des valeurs des coefficients de détermination et de corrélation non significatives (tableau 5). De par sa faible teneur, cette matière organique, même si elle peut fixer du potassium, ne peut pas dominer les processus de fixation et d'échange de cet élément dans les sols étudiés. Elle ne participerait que par 10 à 20 % seulement au processus d'échange évalué par le rapport entre la CEC de la MO et la CEC totale du sol. La CEC de la matière organique est estimée par le produit de son pourcentage dans le sol multiplié par la CEC de 100 g d'humus qui est de 200 meq (Chamayou et Legros, 1989).

En conséquence, même si le potassium échangeable est hautement disponible dans les sols céréaliers du Nord-Ouest de la Tunisie (tableau 1), ses sites de fixation

sont essentiellement minéraux du fait que la matière organique est de faible teneur et sa participation à la capacité d'échange cationique est proportionnelle à ses réserves.

### Le calcaire

Les résultats des tests de corrélation ne montrent aucun lien significatif entre le calcaire total et la matière organique. Ce lien a pu être démontré avec le calcaire actif au seuil 0,05 (tableau 5). L'absence de corrélation avec le calcaire total paraît normale du fait que ce dernier devrait comprendre des particules de la taille des sables et même des fractions grossières qui n'ont aucun lien direct avec la matière organique. La relation positive avec le calcaire actif à particules fines et très fines (Callot et Dupuis, 1980) suppose l'existence d'un rôle de ce calcaire dans la protection et la conservation de la matière organique des sols carbonatés.

## Discussion

La matière organique des sols céréaliers du Nord-Ouest de la Tunisie est actuellement à des niveaux relativement faibles avec des teneurs presque toujours inférieures à 2 %, situation qui peut exposer ces sols à la dégradation par l'érosion hydrique lorsque les pentes deviennent fortes et favorisent un ruissellement efficace. Elle a été évaluée par trois méthodes d'analyse différentes, dont deux par dosage chimique. Le rapport entre la matière organique déterminée par combustion sèche (pp) et le C organique évalué par les deux autres méthodes de dosage chimique (Anne et Walkley & Black) a été souvent élevé et dépasse largement le chiffre 2. Ceci pourrait être dû au chauffage insuffisant (105 °C pendant 24 heures) auquel ont été soumis les échantillons pour déterminer les poids secs.

Concernant la comparaison entre les taux d'extraction du C organique des sols par les méthodes Anne et Walkley & Black, elle a été illustrée par le rapport C (méthode Anne)/C (méthode W & B) qui a été égal à 1,15 pour une moyenne de 39 échantillons; ceci donne un taux d'extraction du carbone de 87 % par la méthode W & B par rapport à celui de la méthode Anne. Ce rapport est

ainsi variable et la valeur de 77 % souvent employée dans les laboratoires pour estimer les teneurs en matière organique des sols n'est pas absolue et doit varier en fonction des types de sols. La valeur de ce taux a atteint 95 % pour des spodosols à texture sableuse (Jolivet et coll., 1998).

La réalisation de tests de corrélation par la régression linéaire simple a mis en évidence un lien hautement significatif entre la méthode Anne et celle de perte de poids. Les valeurs obtenues par la méthode Walkley & Black ne sont que faiblement corrélées à celles de la méthode Anne. Le taux d'extraction plus faible de la méthode W & B et son imprécision (ORSTOM, 1978) seraient à l'origine de l'absence de corrélation significative avec la méthode de combustion sèche. La méthode d'extraction Anne attaque presque complètement le carbone du sol et est achevée par le dosage volumétrique au sel de Mohr. C'est la méthode qui offre le plus de précision et qui peut être adoptée pour les déterminations des matières organiques de ces sols. La méthode par perte de poids nécessiterait davantage d'expérimentation pour préciser la température de séchage la plus adaptée pour ces sols pauvres en matière organique.

Les types de gestion souvent similaires - à peu près les mêmes travaux de préparation des sols, mêmes restitutions (avec des quantités variables selon les rendements) de sous-produits de récoltes (chaumes, racines), mêmes types de fertilisants minéraux appliqués (phosphore, azote) - ayant concerné les sols étudiés depuis plusieurs décennies de cultures céréalières, ont probablement laissé leur impact sur les stocks organiques de ces sols qui sont généralement faibles. Cet état des teneurs réduites en matière organique des sols utilisés pour la céréaliculture sous des milieux bioclimatiques différents est confirmé par divers auteurs (Arrouays et coll., 1994; Cerri, 1988; FAO, 2008). Ces basses teneurs doivent se répercuter négativement sur la structure des sols qui serait édifiée essentiellement grâce aux colloïdes minéraux et dont la stabilité est probablement imparfaite ce qui pourrait générer de nombreuses déficiences de production et de résistance aux facteurs de dégradation.

En outre, comme cette matière organique correspond à un mull calcique à C/N souvent très bas (Ben Hassine, 2002) et qu'elle est morphologiquement intimement liée à la fraction minérale, ses particules seraient retenues à plus de 50 % dans la fraction fine (< 5  $\mu\text{m}$ ), si on se réfère aux résultats de fractionnement de cette matière organique obtenus par Feller (1988) sur des sols argileux des Petites Antilles dont un vertisol. Elle devrait assurer le stockage de l'essentiel de l'azote du sol dont la forme organique est de loin supérieure à la forme minérale (nitrique et ammoniacale). Cet azote organique serait localisé en majorité dans les humines (Dridi, 2007), bien que la corrélation entre N et C de ce composé humique ne soit pas très évidente (Ben Aissa, 1993).

La corrélation significative trouvée entre la matière organique évaluée par combustion sèche et le calcaire actif confirme des conclusions similaires obtenues sur des sols carbonatés. Ce calcaire actif serait plus retenu autour des particules d'humine puisqu'il a été démontré qu'il est plus corrélé avec le carbone de ce composé humique (Ben Aissa, 1993). Les sols étudiés étant tous carbonatés, leur calcaire actif devrait jouer un rôle important dans le processus d'humification en séquestrant rapidement les composés organiques lignifiés sous forme d'humine héritée ou résiduelle (Duchaufour, 1977). Le même processus est apparemment valable pour les sols à excès de Na dans les solutions qui favorisent l'accumulation de l'humine résiduelle (Gallali, 1980). Le calcaire agirait ainsi comme protecteur contre les dégradations biologiques de la matière organique de ces sols pour en faire une phase stable peu sensible même aux apports d'engrais organiques. Cette phase stable de la matière organique est d'ailleurs peu affectée par l'apport de fertilisants, étant donné que la majorité des processus de « turnover » se situent dans la phase dite labile du C organique (Dabin, 1976).

Le renouvellement des réserves organiques dans ces sols a pour seule origine les sous-produits de récolte, en l'occurrence les chaumes et les racines, qui mettraient dans le sol de 121 à 166 g/m<sup>2</sup> de C organique par année de culture selon les espèces (Bolinder et coll., 1994). De tels chiffres, qui amèneraient entre 2,08 et 2,86 tonnes de matière organique, sont très éloignés de

ce qui est cité par Jones et Kimiry (1986, in Le Villo et coll., 2001) concernant les restitutions organiques stables des cultures céréalières sous un climat tempéré humide (550 kg de restitutions obligatoires et 500 kg de restitutions facultatives). Or, en conditions semi-arides, la végétation est moins développée et les restitutions devraient être plus faibles. Ceci dénote l'importance des actions d'intensification des apports organiques dans ces sols, même s'ils étaient dans une situation d'équilibre, comme l'a constaté Cerri (1988) sous une culture de canne à sucre. Seul un changement de mode de culture pourrait remédier à cette carence en apports organiques. Le stock de matière organique aurait doublé en deux ans dans des vertisols de la Martinique nouvellement exploités en culture prairiale (Chotte, 1988).

Cette matière organique en raison de sa faible teneur dans les sols étudiés est peu impliquée dans le processus d'échange cationique qui reste surtout régi par la fraction minérale. Le potassium en provenance de la décomposition des chaumes et qui s'insère en position interfoliaire dans les argiles serait, selon Boissezon (1988), à l'origine du processus d'illitisation de ces dernières, provoquant ainsi une diminution de la CEC du sol. Ce processus de néoformation des illites ne serait cependant pas très important dans ce type de sol, bien que les restitutions de chaumes soient fréquentes. L'ambiance physico-chimique dans ces sols devrait être plutôt dominée par les excès de carbonates qui libèrent du  $\text{Ca}^{++}$  atténuant fortement l'impact du potassium. Il en découle que les charges négatives dans ces sols sont majoritairement saturées en calcium et en magnésium (Ben Hassine, 2002), appuyant ainsi la prédominance de la genèse de beidellite calcique (Ben Hassine, 2006).

Ni le potassium, ni le phosphore ne sont fortement mobilisés par la matière organique dans ces sols. P est apporté essentiellement par fertilisation et sa présence à l'état soluble n'est pas durable. K est surtout libéré par les espèces minérales présentes dans ces sols et qui sont essentiellement des illites et des micas.

Si on conseille les techniques de non-labour ou du labour minimal pour conserver et accroître la séquestration du carbone

organique dans les sols cultivés (Alvaro-Fuentes et coll., 2008; Franzluebbers et Stuedemann, 2008), cette pratique n'est pas applicable pour ce type d'utilisation en grandes cultures qui nécessitent de nombreuses préparations visant essentiellement à améliorer les propriétés physiques et surtout la capacité de rétention en eau. En outre, des travaux récents ont montré que même si la technique de non-labour accroît la séquestration du carbone organique en surface, elle ne l'accumule pas plus dans la totalité du profil que les sols labourés (Blanco-Canqui et Rattan., 2008). Les solutions de recharge pour augmenter les teneurs en matière organique de ces sols seraient les épandages de fumier et de déchets organiques de toutes sortes, dont les boues des stations d'épuration (Korboulesky et coll., 2001). Ces dernières ont cependant le double inconvénient (FAO, 2008) :

- De présenter un risque environnemental de pollution, ce qui nécessite de prendre des mesures spécifiques pour éviter la contamination des sols, des eaux et du couvert végétal.
- D'avoir un rendement très bas en carbone stable dans le sol et de nécessiter des techniques de mûrissement par compostage qui améliorent les fractions de carbone stable pouvant atteindre 0,2 à 0,5 tonne de carbone séquestré pour 20 tonnes/ha de compost.

## Conclusion

La matière organique des sols céréaliers du Nord-Ouest de la Tunisie étudiés sur plusieurs points de prélèvement répartis sur la majorité des types pédogénétiques présents dans ces régions, a été analysée par trois méthodes différentes. Une telle procédure a permis d'évaluer le coefficient de conversion du C organique en matière organique en prenant comme référence la méthode de combustion sèche. Les valeurs de ce coefficient ont été exceptionnellement élevées dans cette étude probablement à cause d'une légère surestimation de cette matière organique par un séchage insuffisant à 105 °C pendant 24 heures. Un séchage à 150 °C aurait été préférable. Cela n'a cependant pas empêché d'obtenir une

corrélation hautement significative avec la méthode Anne. Par ailleurs, les déterminations chimiques du carbone du sol ont permis de trouver un taux d'extraction du C par la méthode Walkley & Black de 87 % par rapport à la méthode Anne pour la quarantaine d'échantillons analysés. Un tel chiffre est supérieur à celui de 77 % déjà connu comme taux d'extraction de la méthode à froid (W & B) par rapport à la méthode à chaud (Anne).

Les teneurs des sols en cette matière organique sont souvent inférieures à 2 % avec quelques exceptions où on peut même trouver des valeurs supérieures à 3 %. Si elle influence nettement le pouvoir d'échange des sols, cette matière organique participe faiblement à la dynamique d'échange de cations du fait de ses faibles réserves (particulièrement le potassium). C'est grâce à leurs argiles que ces sols acquièrent parfois de fortes CEC pouvant dépasser les 30 meq/100 g.

Le phosphore, malgré des teneurs non négligeables sous forme assimilable, n'est pas mobilisé par la matière organique et doit être exposé à la rétrogradation apatitique du fait de l'abondance de calcaire dans les sols étudiés.

Les sols céréaliers peuvent avoir acquis un équilibre entre les entrées et les sorties du C organique, mais au vu des faibles teneurs en cet élément, les risques de dégradation de la structure et le déclenchement de processus érosifs sont possibles. Le meilleur remède à cette situation serait un changement de mode de gestion de ces sols qui a montré ses effets positifs dans d'autres milieux. Une telle éventualité n'est pas applicable dans les conditions actuelles puisque les sols sont destinés à produire des grains de céréales dont la demande à l'échelle locale et internationale est sans cesse croissante. L'épandage des boues d'épuration après traitement par compostage est une autre solution qui pourrait être envisagée, en prenant toutes les précautions nécessaires pour éviter la pollution du milieu.

## Bibliographie

- Albrecht, A. 1988. Influence du système de culture sur l'agrégation d'un vertisol et d'un sol ferrallitique (Antilles). Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXIV, n° 4, pages 351-333.
- Alvaro-Fuentes, J., M.V. Lopez, C. Cantero-Martinez and J.L. Arriue. 2008. Tillage effects on soil organic carbon fractions in mediterranean dryland agroecosystems. Soil Science Society American Journal, V:72, 541-547.
- Arrouays, D., J.L. Kicin, Ph Péliissier et I. Vion. 1994. Évolution des stocks de carbone des sols après déforestation : analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique. Étude et gestion des sols, n° 2, pages 29-38.
- Ben Aissa, N. 1993. Rôle de la matière organique dans la pédogenèse des sols de la Tunisie septentrionale. Thèse, Faculté des sciences de Tunis, 150 pages.
- Ben Hassine, H. 2002. Étude de l'évolution des propriétés chimiques et physico-hydriques des principaux types de sols céréaliers du Nord-Ouest tunisien. Effets sur les productions céréalières. Thèse, Université de Provence, Aix-Marseille I, 299 pages + annexes.
- Ben Hassine, H., M.H. El Aouni, G. Bonin et M. Ben Salem. 2005. Importance des réserves potassiques naturelles dans les sols céréaliers du Nord-Ouest tunisien. Revue « Agrosol », vol. 12, n° 1, Québec, Canada, pages 33-46.
- Ben Hassine, H. 2006. Nature minéralogique et rôle nutritionnel des argiles de sols céréaliers en région subhumide à semi-aride (Tunisie). 2006. Revue Geoscience, Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, 338, pages 329-340.
- Bigorre, F., D. Tessier et G. Pédro. 2000. Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations. Revue Geoscience, C. R. Acad. Sci. Paris, 330, 245-250.
- Blanco-Canqui, H. et R. Lal. 2008. No tillage and soil profile carbon sequestration : an on-farm assessment. Journal of soil science society of America. Volume 72: 693-701.
- Boissezon (de) P. 1988. Effets de l'enfouissement de paille de luzerne sur la capacité d'échange d'un sol brun sur limon des plateaux. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXIV, n° 4, pages 337-339.
- Bolinder, M.A., D.A. Angers et R.P. Voroney. 1994. Analyse de la dynamique de la matière organique des sols du Québec sous différents systèmes culturaux à l'aide du modèle de simulation Century. Revue « Agrosol », vol. 7, n° 2, Québec, Canada, pages 12-17.
- Brossard, M. et J.Y. Laurent. 1988. Matière organique et formes organiques et minérales de stockage du phosphore dans un vertisol. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXIV, n° 4, pages 347-349.
- Callot, G. et M. Dupuis. 1980. Le calcaire actif des sols et sa signification. Science du sol n° 1, pages 17-27.
- Cerri, C.C. 1988. Dynamique de la matière organique du sol après défrichement et mise en culture. Utilisation du traçage isotopique naturel en <sup>13</sup>C. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXIV, n° 4, pages 335-336.
- Chamayou, H. et J.P. Legros. 1989. Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. ACCT - CILF - Presses universitaires de France, pages 194-196.
- Chotte, J.L. 1988. Importance de l'activité rhizosphérique dans la dynamique de reconstitution du stock organique des sols (vertisol, Martinique). Traçage isotopique <sup>15</sup>N. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXIV, n° 4, pages 345-346.
- Dabin, B. 1976. La formation des produits humiques dans le sol, leur importance en agriculture. Conférence donnée au Colloque de la matière organique des sols - Piracicaba (SP), 24-28 nov. Brésil, 12 pages.
- Dridi, I. 2007. Répartition et dynamique de l'azote dans les sols des régions méditerranéennes : exemple des sols de la Tunisie centrale et septentrionale. Thèse, Faculté des sciences de Tunis, 238 pages.
- Duchaufour, P. 1977. Pédologie, 1 - Pédogenèse et classification. Masson, Paris, pages 28-67.
- Duchaufour, P. 1991. Pédologie. Sol, végétation, environnement. Masson, Paris, pages 252-276.
- FAO, 2008. La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. FAO, Département du développement durable. Référence Internet : [www.fao.org/DOCREP/005/Y/2779F/y2779f04.html](http://www.fao.org/DOCREP/005/Y/2779F/y2779f04.html), 63 pages.
- Feller, C. 1988. Effet de différents systèmes de culture sur les stocks organiques de sols argileux des Petites Antilles. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXIV, n° 4, pages 341-343.
- Franzluebbers, A.J. and J.A. Stuedemann. 2008. Early response of soil organic fractions to tillage and integrated crop-livestock production. Soil Science Society American Journal, V:72, 613-625.
- Gallali, T. 1980. Transfert sels - matière organique en zones arides méditerranéennes. Thèse d'état, Université de Nancy 1, 202 pages.
- Jolivet, C., D. Arrouays et M. Bernoux. 1998. Comparison between analytical methods for organic carbon and organic matter determination in sandy spodosols of France. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 29, 15-16, 2227-2233.
- Leprun, J.C. 1988. Matière organique et conservation des sols, exemples brésiliens. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXIV, n° 4, pages 333-334.
- Le Villo, M., D. Arrouays, W. Deslais, J. Daroussin, Y. Le Bissonnais et D. Clergeot. 2001. Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaire pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné. Étude et gestion des sols, volume 8, 1, pages 47-63.

Korboulewsky, N., G. Masson, G. Bonin, C. Massiani et Prone. 2001. Effets d'un apport de compost de boues de station d'épuration dans un sol d'un vignoble du Sud de la France. *Étude et gestion des sols*, vol. 8, n° 3, pages 203-210.

Ministère de la Coopération, France. 1974. *Mémento de l'agronome, techniques rurales en Afrique*, pages 1373-1386.

Moreno, M.T., P. Audesse, M. Giroux, N. Frenette et M. Cescas. 2001. Comparaison entre la détermination de la matière organique des sols par la méthode de Walkley-Black et la méthode de perte au feu. *Revue « agrosol »*, vol. 12, n° 1, Québec, Canada, pages 49-58.

Naânaâ, W. et J. Susini. 1988. *Méthodes d'analyse physique et chimique des sols*. ES 252, Direction des Sols, ministère de l'Agriculture, Tunisie, 118 pages.

N'Dayegamiye, A. 1995. Effet d'apport de fumier et de fumure minérale sur l'évolution de la production de maïs-ensilage et du blé, et du bilan humique dans un loam argileux de la série Le Bras, essais de longue durée. *Revue « Agrosol »*, vol. 8, n° 1, Québec, Canada, pages 23-29.

ORSTOM. 1978. *Manuel d'analyse des matières organiques des sols*. SSC de l'ORSTOM, Bondy, France, 17 pages.