

Caractérisation des fractions colloïdales minérales et organiques des horizons superficiels des sols d'une toposéquence en zone semi-aride de la Tunisie

H. Ben Hassine⁽¹⁾, N. Karbout⁽¹⁾, K. Kridane⁽¹⁾, M. Sanaa⁽²⁾ et N. Jedidi⁽³⁾

1) Ecole supérieure d'agriculture de Mograne 1121, Université de Carthage, Tunisie

2) Institut national agronomique de Tunis, 43, Avenue Charle Nicolle Tunis 1002, Université de Carthage, Tunisie

3) Centre d'étude et de recherche des technologies des eaux, Borj Cedria, Tunisie

*: Auteur correspondant : habib.benhassine10@gmail.com

RÉSUMÉ

Sur une toposéquence représentative des zones septentrionales semi-arides de la Tunisie, se succèdent de l'amont vers l'aval les unités de sols suivantes : un RENDOSOL à horizon A humifère, un CALCOSOL calcarique érodé, des COLLUVIOSOLS cultivés de bas de versant, des FLUVIOSOLS typiques, des CALCOSOLS vertiques et des TOPOVERTISOLS cultivés. Dix points implantés le long de cette toposéquence ont été échantillonnés en surface (0-20 cm) et analysés. Les résultats analytiques ont mis en évidence d'abord les contrastes très nets des teneurs en matière organique entre les sols cultivés et les sols non cultivés et ensuite l'homogénéité relative des réserves en carbone organique des sols de la plaine gérés par la monoculture des céréales et des fourrages sous conditions pluviales. Pour les minéraux argileux, c'est la kaolinite qui est présente dans presque tous les points, avec une répartition variable des illites et une concentration des smectites à l'aval. Un certain gradient amont-aval est constaté dans la distribution des smectites ; elles sont en effet peu représentées à l'amont, font leur apparition sous forme d'interstratifiés illite-smectite au milieu et s'individualisent dans la partie la plus basse de la forme géomorphologique. Cette répartition laisse supposer une genèse des smectites dans les zones plus confinées et mal drainées par transformation des illites.

Le fractionnement des substances humiques a confirmé la forte proportion d'humine non extractible par rapport aux acides fulviques et humiques. Elle serait héritée par accumulation de la lignine dont la décomposition est rapidement inhibée par le calcium, présent en excès dans ces sols. Aucune relation évidente entre minéraux argileux et fractions humiques n'a pu être dégagée, hormis une tendance à l'accroissement du niveau de maturation dans les points à plus forte concentration en smectites.

La restauration et la réhabilitation organiques des sols cultivés requièrent des apports exogènes énormes. A elles seules, les restitutions par les résidus des récoltes sont très insuffisantes pour couvrir les larges écarts entre les stocks actuels et les valeurs seuils optimales ; il y a même des risques que la situation actuelle s'aggrave malgré une protection contre la dégradation de ces sols assurée par l'action conjointe de l'importante fraction argileuse édifiant et stabilisant la structure et la faible pente ne favorisant pas le ruissellement.

Mots clés

Sol, carbone organique, acide fulvique, acide humique, minéral argileux, Tunisie.

SUMMARY

CHARACTERIZATION OF MINERAL AND ORGANIC COLLOIDAL FRACTIONS OF SUPERFICIAL HORIZONS OF SOILS OF A TOPOSEQUENCE IN A SEMI-ARID ZONE OF TUNISIA.

On a toposequence of lands representative of northern semi-arid zones of Tunisia (figure 2), succeed one another from uphill to downhill the following soils unities (figure 3): an organic lithic xerochrept, an eroded calcixerollic xerochrept, typic xerofluvents, vertic xerochrepts and vertisols. Ten points along this toposequence (figure 2) were sampled in the surface layer (0-20 cm) and analysed. Analytic results showed firstly very clear contrasts in organic matter content between soils under cultivation and uncultivated soils, and secondly the relative homogeneity in organic carbon contents of soils of the plain used for cultivation of rainfed cereal and forage crops (table 1).

With regard to clay minerals, it is the kaolinite which is present in almost all points, with a variable distribution of illites and a smectites concentration downhill (table 2). A certain uphill – to – downhill gradient is noticed in the smectites distribution; these minerals are indeed little represented uphill, appear as interstratified illite-smectite in the middle (figure 4) and become individualized in the lowest part of the geomorphologic form (figure 5). This distribution leads one to suppose a smectite genesis in the most confined and badly drained zones, by transformation of illites.

The humic substances fractionation confirmed the large proportion of non-extractible humine in terms of fulvic and humic acids (table 3). It would be inherited by accumulation of lignine whose decomposition is rapidly inhibited by calcium, present in excess in those soils. No evident relation between clay minerals and humic fractions could be drawn (table 4), except for an increasing tendency in the maturation level of points with high concentration of smectites.

The organic restoration and rehabilitation of cultivated soils require enormous quantities of exogenous materials. The returns from harvesting residues alone (table 5) are very insufficient to cover the large differences between current stocks and optimal values; there is even a risk that the current situation gets worse in spite of a protection against the degradation of those soils ensured by the joint action of the important clay fraction building up and stabilizing the structure and the low slope not favouring the erosion.

Key-words

Soil, organic carbone, fulvic acid, humic acid, clay mineral, Tunisia.

RESUMEN

CARACTERIZACIÓN DE LAS FRACCIONES COLOIDALES MINERALES Y ORGÁNICAS DE LOS HORIZONTES SUPERFICIALES DE LOS SUELOS DE UNA TOPOSECUENCIA EN ZONA SEMIÁRIDA DE TÚNEZ.

En una toposecuencia representativa de las zonas septentrionales semiáridas de Túnez, se sucedan de río arriba a río abajo las unidades de suelos siguientes: un RENDOSOL con horizonte A humífero, un CALCOSOL calcárico erosionado, COLUVIOSOLES cultivados a la parte inferior de los vertientes, FLUVIOSOLES típicos, CALCOSOLES vérticos y TOPOVERTISOLES cultivados. Se muestrearon diez lugares implantados a lo largo de esta toposecuencia en superficie (0 – 20 cm) y analizados. Los resultados analíticos pusieron en evidencia primero los contrastes muy netos de las tasas de materias orgánicas entre los suelos cultivados y los suelos no cultivados y después la homogeneidad relativa de las reservas en carbono orgánico de los suelos de la planicie gestionados por el monocultivo de los cereales y de los forrajes bajo condiciones temporales.

Para los minerales arcillosos, la caolinita está presente en casi todos los lugares, con una repartición variable de las illitas y una concentración de las esmectitas río abajo. Se observó un cierto gradiente río arriba – río abajo en la distribución de las esmectitas; en efecto están poco representadas río arriba, hacen su aparición bajo forma de interestratificadas illita-esmectita en el medio y se individualizan en la parte más baja de la forma geomorfológica. Esta repartición deja suponer una génesis de las esmectitas en las zonas más confinadas y mal drenadas por transformaciones de las illitas.

Palabras clave

Suelos, carbono orgánico, ácidos fúlvicos y húmicos, minerales arcillosos, Túnez.

Les sols constituent les supports physiques et les réservoirs en eau et en éléments nutritifs pour les végétaux dont les organes aériens et souterrains leur cèdent en contrepartie du carbone organique évoluant partiellement en substances humiques stables. Celles-ci forment avec les particules fines de la fraction minérale et particulièrement les phyllosilicates la partie chimiquement mais aussi physiquement active de ces sols. En effet, les minéraux argileux offrent d'importantes surfaces de contact avec les solutions voisines et assurent les rôles de fixation et d'échange de cations (Morel, 1989; Hubert, 2008); la matière organique dite stable, en sus de ses fonctions actives (carboxyliques, phénol, alcool) s'associe à ces colloïdes minéraux pour former des complexes colloïdaux assurant la cohésion des particules élémentaires du sol (Mac Carthy *et al.*, 1990 *in* Eyheraguibel, 2004). La structure du sol est ainsi stabilisée par un grand nombre de liaisons électrostatiques et de liaisons faibles établies entre les molécules organiques et les argiles (Balesdent, 1996 *in* Eyheraguibel, 2004) et ce, bien que leurs propriétés soient indépendantes et additives (Bigorre *et al.*, 2000).

Cette association améliore les propriétés physico-chimiques des sols (Dridi et Toumi, 1999; Blanchart *et al.*, 2000; Thuriès *et al.*, 2000; Mrabet *et al.*, 2004), en particulier l'aération, la rétention en eau, l'infiltration, le pouvoir d'échange de cations et la stabilité structurale. L'identification de ces colloïdes en zone semi-aride caractérisée par les faibles réserves organiques de ses sols n'est pas sans intérêt et pourrait aboutir à leur quantification et à l'évaluation du potentiel de fertilité qu'ils constituent surtout en terrains cultivés. La fraction minérale ne semble pas subir beaucoup de perturbation dans les sols soumis à une intense préparation pour leur mise en culture, mais c'est la fraction organique qui s'en trouve fortement affectée (Arrouays *et al.*, 1994; Chevalier, 1999; Jolivet, 2000; Naman *et al.*, 2001; Dignac, 2007). Ce travail constitue l'occasion pour confirmer ces constatations et mettre en évidence les différences entre sols cultivés et ceux conservés naturellement.

L'identification minéralogique de la fraction argileuse et la séparation des substances humiques extractibles en milieu alcalin et acide permettent, en outre, de collecter de nouvelles données sur ces terres semi-arides issues de matériaux carbonatés. L'étude devient plus explicative en répartissant les observations sur une toposéquence allant du piémont de la montagne sous végétation naturelle jusqu'au milieu de la plaine extensivement cultivée en espèces céréalières pluviales. L'objectif recherché est de contribuer à évaluer, d'une part les rôles et la répartition de ces différentes espèces minéralogiques qui constituent les particules chimiquement actives et sont une source d'éléments nutritifs pour les cultures et, d'autre part, la variation qualitative et quantitative des substances humiques en fonction (i) de la topographie et du mode d'utilisation du sol et (ii) de la couverture pédologique de la toposéquence considérée.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Situation géographique et milieu naturel de la zone d'étude

La toposéquence choisie s'étend, dans une direction Sud-Est - Nord-Ouest, depuis le piémont du versant nord du mont Zaghouan jusqu'à la rive droite de l'axe de drainage majeur de la région qui est l'oued Miliane. Le mont Zaghouan prolonge dans la direction Nord-Est la chaîne de la Dorsale tunisienne qui sépare le nord du centre du pays (figure 1). Sur les versants nord de cette chaîne et les plaines qu'ils dominent, la pluviométrie atteint généralement ou dépasse les 400 mm/an ce qui fait que ces zones sont sous l'effet de l'étage méditerranéen semi-aride; les pluies se répartissent entre les saisons hivernale, automnale et printanière, soit généralement entre septembre et mai de chaque année. L'altitude de la toposéquence varie entre 250 m au Sud-Est et 140 m au Nord-Ouest. Les matériaux originels des sols sont le calcaire dur du Campanien en amont auquel succèdent des colluvions encroûtées puis des dépôts alluviaux récents dans la plaine (figure 2).

La végétation se compose sur le monticule de la zone amont d'espèces arbustives (*Calycotome villosa*) et de touffes d'alfa (*Stipa tenacissima*) avec quelques spontanées annuelles. Juste à la rupture de pente, sur quelques centaines de mètres et sur les matériaux encroûtés, prend place l'arboriculture fruitière avec en intercalaire des cultures légumières irriguées. Le reste de la plaine est exploité en cultures annuelles: céréales et fourrages en sec.

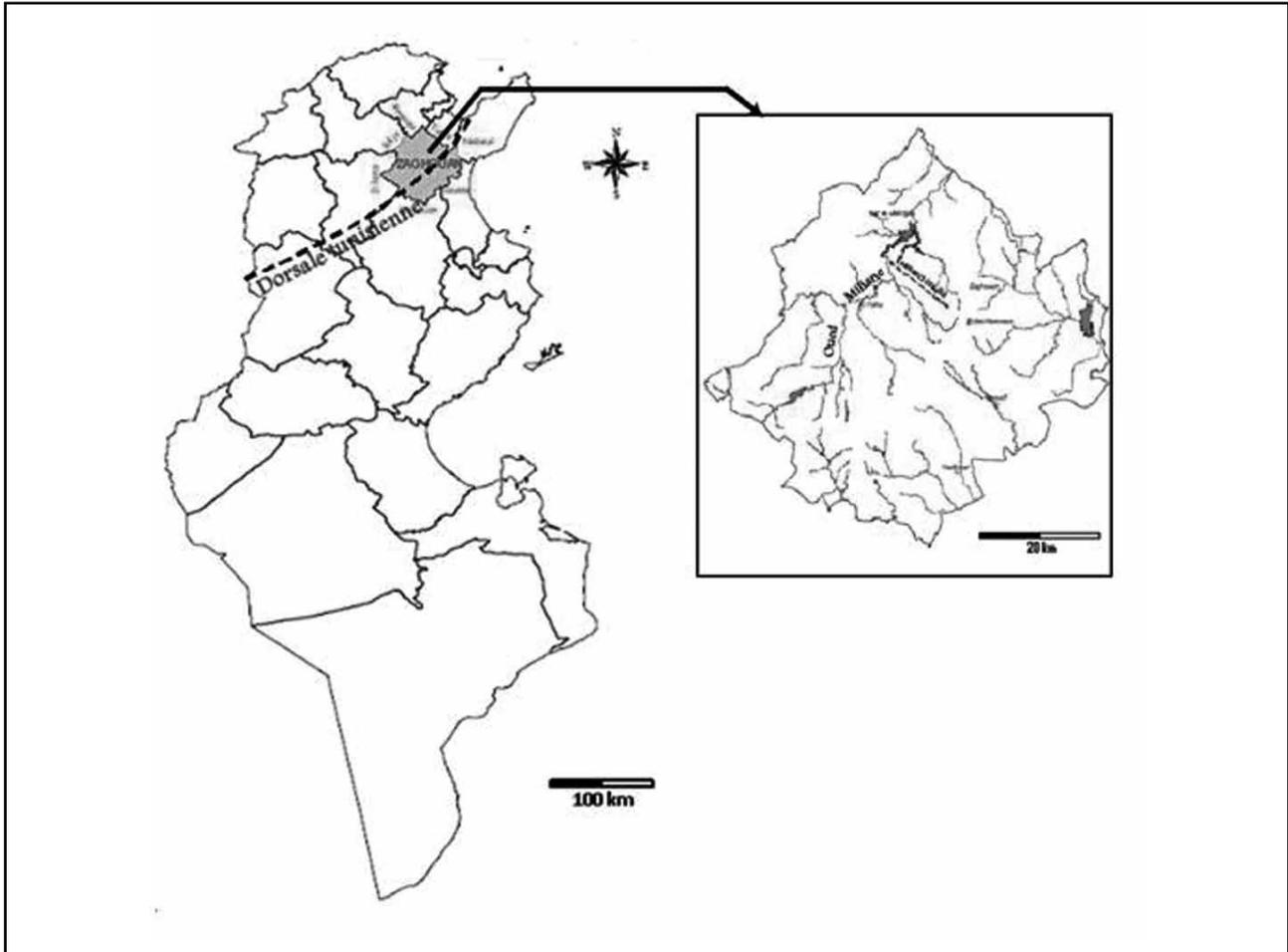
Les sols de la toposéquence

De l'amont vers l'aval, selon Aloui (1976) dont la classification a été établie en se référant à la CPCS (1967), on distingue la succession de sols suivante (figure 3) citée selon le classement du référentiel pédologique (AFES, 2008):

- Le sommet et le flanc du monticule sont couverts par un RENDOSOL à horizon A humifère (rendzine humifère) sur du calcaire dur du Campanien.
- Avec la rupture de pente, un sol fortement carbonaté de couleur pâle dès l'horizon de surface s'individualise; il correspond à un CALCOSOL calcarique érodé (sol brun calcaire érodé). Il est suivi par un COLLUVIOSOL calcaire de bas de versant (sol peu évolué non climatique d'apport colluvial).
- Sur le cône de déjection de l'un des affluents de la rive sud de l'oued Miliane, s'étendent des FLUVIOSOLS typiques cultivés (sols peu évolués non climatiques d'apport alluvial).
- Dans le reste de la plaine à altitude très monotone et dans laquelle d'épaisses alluvions se déposent, se côtoient des CALCOSOLS vertiques cultivés (classés selon Aloui (1976) comme sols isohumiques à complexe saturé évoluant sous pédoclimat à hiver frais, bruns ou marrons) et des

Figure 1 - Plan de situation de la dorsale tunisienne et de la région de Zaghouan en Tunisie (CRDA de Zaghouan, 2011).

Figure 1 - Situation map of the tunisian « Dorsale » and Zaghouan region in Tunisia (CRDA of Zaghouan, 2011).



TOPOVERTISOLS cultivés (topomorphes à drainage externe réduit, non grumosoliques).

Prélèvement des échantillons de sols

Dix points ont été implantés le long de la toposéquence avec un objectif de couvrir tous les types de sols présents dans la zone. Ils ne se succèdent pas sur une même ligne droite car le point 8 se trouve un peu décalé faute d'accès faciles. Le point 1 se situe dans une unité complexe du fait que la rendzine humifère est en juxtaposition avec des lithosols sur calcaire dur du Campanien. L'échantillonnage a été effectué sur les 20 centimètres supérieurs, en janvier 2011, période au cours de laquelle la majorité des sols cultivés sont couverts par des cultures annuelles à jeune stade végétatif (début de tallage pour les céréales). Les précédents culturaux sont aussi des cultures annuelles pluviales à cycle hivernal. Les points 2 et 3

sont occupés par l'arboriculture extensive (oliviers, pêchers) avec des cultures maraîchères et légumières annuelles en intercalaire. Les roches et les matériaux originels des sols de la toposéquence ont été identifiés sur la carte géologique de Zaghouan au 1/50000 (Bajanik *et al.*, 1968). La répartition des échantillons en fonction des types de sols est la suivante (figure 2):

- **Point 1:** RENDOSOL à horizon A humifère (rendzine) sur calcaire dur du Campanien, couvert d'une végétation naturelle composée de *Calycotome villosa* et de touffes d'alfa (*Stipa tenacissima*); sol utilisé comme parcours naturel.
- **Point 2:** CALCOSOL calcaire érodé (brun calcaire) sur limons rouges du Villafranchien, cultivé en oliviers irrigués avec production de légumineuses d'hiver en intercalaire.
- **Point 3:** COLLUVIOSOL calcaire, de bas de versant sur colluvions (sol peu évolué non climatique d'apport colluvial),

(Kjeldahl) et réception dans une solution d'acide borique; dosage par une solution diluée de HCl.

- Le phosphore assimilable: extraction au bicarbonate de sodium 0,5 N (Olsen); dosage colorimétrique à la longueur d'onde 660nm.
- Le potassium échangeable: extraction par une solution d'acétate d'ammonium 1 N ajustée à pH = 8,2; dosage par photométrie de flamme.
- La capacité d'échange cationique (CEC): percolation de 10 g de sol par une solution normale de NaCl, lavage à l'alcool et nouvelle percolation par une solution d'acétate d'ammonium 1 N à pH = 8,2. Dosage de Na⁺ dans le filtrat par photométrie de flamme.

La diffraction des rayons X

L'extraction de la fraction argileuse a été faite sur 100 g de sol par sédimentation selon la loi de Stokes, après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée diluée (3v) et dispersion par l'ammoniaque. Après écoulement du temps de chute des particules à diamètre supérieur à 2µm, la suspension est siphonnée dans un autre récipient puis évaporée à 70 °C. L'opération est répétée jusqu'à obtention d'une eau claire ne contenant plus de particules fines.

La diffraction des rayons X a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre de marque Philips à la Faculté des Sciences de Tunis. Les échantillons soumis à la diffraction sont:

- une poudre désorientée pour mettre en évidence les pics relatifs aux minéraux autres que les argiles;
- une lame orientée normale par humectation à l'eau de la fraction argileuse pour séparer entre argiles hydratables (smectites) et argiles à espace interfoliaire sec (illites);
- une lame traitée à l'éthylène-glycol pour déplacer le pic des smectites vers 1,8nm;
- enfin une lame chauffée à 500 °C pour rabattre tous les minéraux 2/1 à 1 nm et distinguer entre kaolinite et chlorite: le pic de la kaolinite disparaît à cette température par déshydroxylation et celui de la chlorite se maintient à 0,7nm.

L'extraction des matières humiques (méthode de Duchaufour et Jacquin (1963) in Naanaa et Susini (1988))

Les fractions humiques déterminées sont les acides fulviques et humiques, solubles tous les deux en milieu alcalin; leur séparation se produit en milieu acide dans lequel les acides humiques sont précipitables. L'extraction est réalisée sur 10 g de sol par addition de 100 ml de pyrophosphate de sodium 0,1 N à pH = 10 et 10 g de Na₂SO₄, puis agitation pendant 48 heures. Sur 10 ml de filtrat est dosé par colorimétrie à 600 nm, le carbone des acides fulviques et humiques après évaporation à sec à 70 °C et attaque au bichromate de potassium en milieu sulfurique.

Pour les acides humiques, on additionne à 40 ml de filtrat 4 ml d'acide sulfurique pur, on laisse une nuit pour floconnage

des acides humiques puis on filtre et on lave à l'acide sulfurique 0,1 N. Ensuite on redissout les flocons retenus sur le filtre dans un autre récipient par arrosage avec 50 ml de NaOH 0,1 N. On évapore 20 ml du filtrat puis on réalise le dosage colorimétrique du carbone comme pour l'ensemble des acides fulviques et humiques.

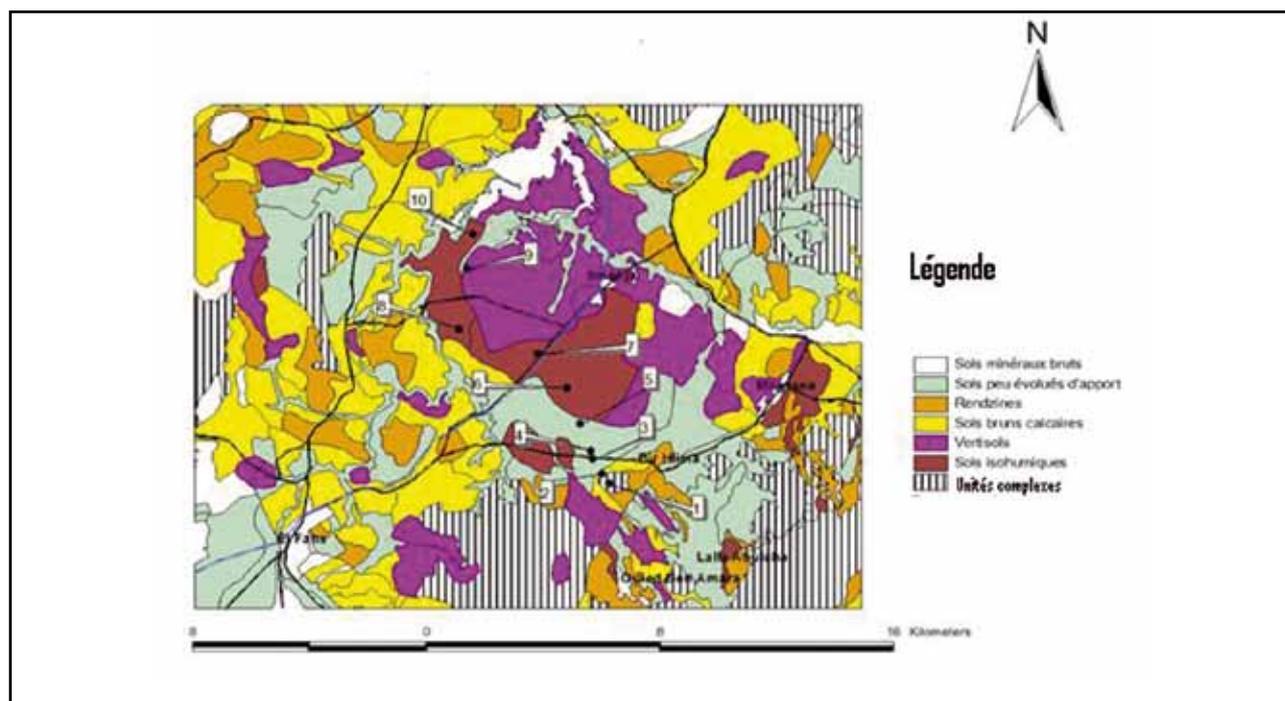
RÉSULTATS

Caractérisation analytique des sols

Les résultats des analyses physico-chimiques des échantillons prélevés sont portés sur le *tableau 1*. On constate que la fraction argileuse varie entre 19,5 % pour le point 1 à 58,4 % pour le point 7. Le calcaire est partout présent mais le point 2 à encroûtement affleurant en surface est celui qui présente le pourcentage le plus élevé avec 67,5 %. Le pH est partout supérieur à 8 et la conductivité électrique est faible, indiquant que le milieu est peu affecté par les sels solubles. La teneur en carbone organique fait l'exception dans le point 1 situé le plus en amont avec 4,31 %; pour tous les autres points, cette teneur reste en dessous de 1 % (*tableau 1*). Cette valeur exceptionnelle du point 1 serait due à l'accumulation de la matière organique qui n'est pas fortement minéralisée grâce à l'absence de travail du sol puisqu'il n'est pas cultivé.

Pour le reste de la plaine, dominée par les sols alluviaux, la teneur moyenne en carbone organique n'est que de 0,77 % avec un écart-type de 0,079. Au contraire, pour la fraction argileuse, un accroissement de ses teneurs est observé dans les sols formés sur des alluvions (points 5 à 10) où la moyenne est de 40,0 % avec un écart-type de 9,54 %.

Le rapport C/N est proche de 10 dans les points 2, 3, 4, 6 et 7; il est assez bas pour les points 5, 8, 9 et 10 où un déséquilibre entre carbone et azote organiques apparaît et serait dû à des réserves azotées excédentaires apportées par fertilisation et n'ayant pas quitté la surface du sol. Les teneurs en P₂O₅ assimilable sont modérées malgré la fertilisation phosphatée répétée de ces sols et reflètent l'impact des carbonates de calcium sur la rétrogradation apatitique du phosphore soluble. Pour le potassium échangeable, les trois derniers points de la toposéquence et le site n° 6 sont les plus pourvus en cet élément avec des réserves constituant presque le triple de celles des autres points cultivés; le point 1, malgré sa richesse en matière organique ne contient que 0,23 meq/100 g de K échangeable. Enfin, la CEC présente les valeurs les plus élevées dans les deux derniers points situés en aval; les points 2, 4, 6 et 7 présentent des valeurs proches de 20 meq/100 g, mais la moyenne des sols issus de dépôts alluviaux (points 5 à 10) s'approche de 30 avec 29,7 meq/100 g et un coefficient de variation de 7,7 %.

Figure 3 - Carte pédologique de la zone étudiée avec les points d'échantillonnage (CRDA de Zaghouan, 2011).**Figure 3** - Soils map of the studied zone with the sampling points (CRDA of Zaghouan, 2011).

On tire comme conclusion qu'il y a une certaine hétérogénéité entre les différents points, illustrée surtout par la valeur très exceptionnelle de la teneur en matière organique du point 1 et aussi par la distinction relative des derniers points de la toposéquence par leur plus nette richesse chimique: CEC et K échangeable.

Répartition des minéraux argileux sur la toposéquence

L'interprétation des diagrammes de diffraction des rayons X obtenus sur lame orientée normale, par glycolage et par chauffage à 500 °C a permis d'identifier les minéraux argileux suivants (tableau 2): la kaolinite, l'illite, la smectite et les interstratiés illite-smectite (I-S) et illite-chlorite (I-C). La

Tableau 1 - Résultats des analyses physico-chimiques des sols étudiés.**Table 1** - Results of the physico-chemical analysis of the studied soils.

Echantillons	Granulométrie %					CaCO ₃ %		pH	CE25°C mS/cm	Corg %	Ntot %	C/N	P ₂ O ₅ ass ppm	K éch meq/100 g	CEC meq/100 g
	A	LF	LG	SF	SG	Total	Actif								
1	19,5	21,7	38,7	9,8	8,8	34,7	19	8,48	0,94	4,31	0,236	18,2	17,6	0,23	28,0
2	31,6	34,9	18,1	8,6	5,8	67,5	26	8,24	0,73	0,62	0,06	10,3	32,9	0,45	22,8
3	35,4	53,1	4,4	5,7	1,4	40,9	20	8,14	1,47	0,79	0,07	11,3	21,5	0,49	32,1
4	24,5	48,9	16,3	8,6	1,0	26,0	16,5	8,3	0,85	0,75	0,08	9,4	23,6	0,47	19,8
5	31,0	22,1	31,0	14,	0,9	14,5	14	8,37	0,46	0,89	0,18	4,9	44,5	0,43	28,8
6	35,3	26,5	4,1	24,8	8,4	16,6	14	8,47	1,07	0,83	0,09	9,2	39,8	1,38	21,7
7	58,4	23,4	7,8	8,3	1,2	41,6	20	8,54	0,8	0,80	0,10	8,0	16,5	0,58	22,9
8	36,5	16,6	13,3	22,5	10,6	44,6	20	8,45	0,42	0,73	0,14	5,2	31,5	1,34	26,9
9	40,2	32,0	12,7	11,7	2,3	17,3	19	8,29	0,52	0,71	0,13	5,5	21,5	1,58	37,2
10	38,3	31,0	14,7	12,7	2,9	36,0	17	8,35	0,52	0,82	0,19	4,3	40,7	1,62	40,7

répartition latérale de ces phyllosilicates sur la toposéquence en quantité et en qualité n'est pas identique pour tous les points. Si la kaolinite est presque partout représentée à l'exception des deux points de l'amont où elle est repérée soit en traces soit en plus faible quantité, les autres argiles sont distribuées d'une manière assez hétérogène.

L'illite est plus abondante au milieu de la toposéquence dans les FLUVIOSOLS (points 4 et 5) et les CALCOSOLS

(points 6, 7) où le pic de 1 nm très évasé à la base indique aussi la présence d'un interstratifié illite-smectite (figure 4). La smectite est plus identifiée dans le CALCOSOL érodé (point 2) mais surtout en aval dans le TOPOVERTISOL (figure 5) et le CALCOSOL le plus proche du lit de l'oued Miliane (points 9 et 10). Enfin de la chlorite (points 7 à 10) et un interstratifié illite-chlorite (points 5, 6, 9 et 10) sont observés au milieu et à l'aval de la forme géomorphologique étudiée. Du gypse a pu aussi être

Tableau 2 - Estimation quantitative des minéraux argileux identifiés par diffraction des rayons X.

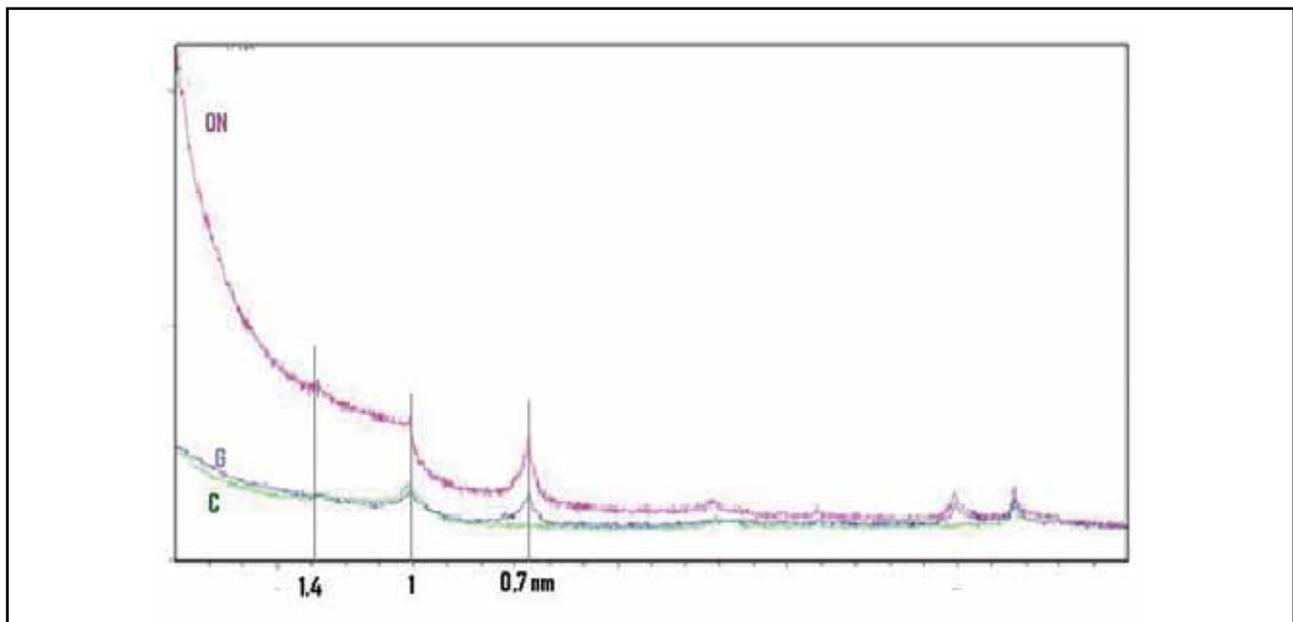
Table 2 - Quantitative evaluation of clay minerals identified by X rays diffraction.

Points	Type de sol	Kaolinite	Illite	Smectite	Chlorite	Interstratifié I-S	Interstratifié I-C	Calcite	Gypse	CEC meq/100 g
1	RENDOSOL	traces	traces	traces	-	-	-	+++	-	28,0
2	CALCOSOL érodé	+	+	++	-	-	-	+++	-	22,8
3	COLLUVIOSOL	++	+	+	traces	-	-	++	+	32,1
4	FLUVIOSOL	++	++	+	-	-	-	++	+	19,8
5	FLUVIOSOL	++	++	+	traces	+	+	+	traces	28,8
6	CALCOSOL	++	++	traces	-	+	+	+	+	21,7
7	CALCOSOL	++	++	traces	+	+	-	++	traces	22,9
8	CALCOSOL	++	+	+	+	-	-	++	traces	26,9
9	TOPOVERTISOL	++	+	++	+	-	+	++	+	37,2
10	CALCOSOL	++	+	++	+	-	+	++	traces	40,7

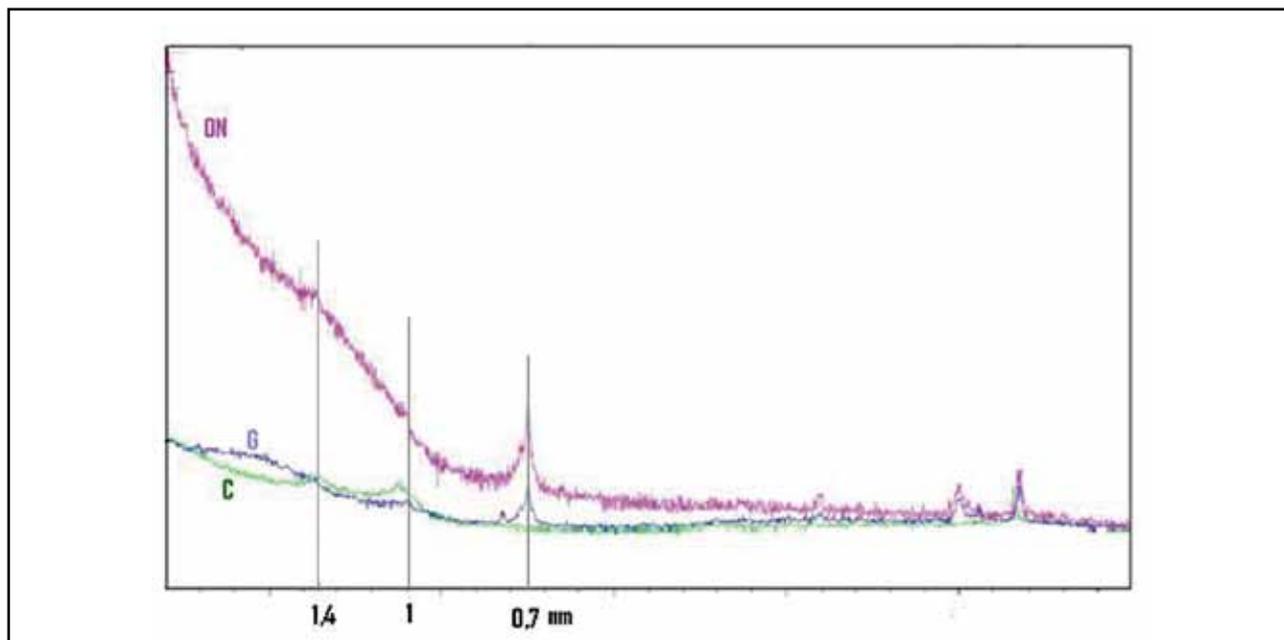
Abondance en fonction des pics de rayons X: + moyennement abondant; ++ abondant; +++ fortement abondant.

Figure 4 - Diffractogramme des rayons X de la fraction argileuse du point 7.

Figure 4 - X ray diffractogramme of clayey fraction of point 7.



ON: orienté normal; G: glycolisé; C: chauffé. N: normal oriented; G: glycolised; C: heated

Figure 5 - Diffractogramme des rayons X de la fraction argileuse du point 9 (TOPOVERTISOL).**Figure 5** - X ray diffractogramme of clays of point 9 (Chromoxerert).

repéré par un faible pic de 0,75 nm environ, avoisinant celui de la kaolinite, sur le diagramme glycolé uniquement (figure 5); il s'observe sur presque toute la forme plate de la toposéquence et aurait un lien évident avec l'origine des alluvions.

Comparées aux valeurs de la capacité d'échange cationique, ces estimations quantitatives permettent de constater que l'abondance de la smectite dans les deux derniers points de la toposéquence serait à l'origine des plus fortes valeurs de ce paramètre. Pour le point 1 très humifère et en l'absence d'argiles minéralogiques, la CEC est exclusivement liée à la matière organique. Pour le point 2, malgré l'abondance relative de la smectite, la CEC n'est que de 22,8 meq/100 g; ceci reviendrait à la plus faible quantité d'argiles minéralogiques par rapport à la calcite qui domine dans la fraction minérale de ce sol encroûté. En effet, les teneurs en calcaire total et actif de ce sol sont respectivement de 67,5 % et 26 %.

Répartition des fractions humiques sur la toposéquence

La nette différence entre concentration en C organique du sol non cultivé (point 1) et les sols constamment travaillés est aussi illustrée par les teneurs en acides humiques et fulviques qui sont largement différentes. On trouve en effet dans le point de l'amont 1,6 % de C d'acides humiques et 0,245 % de C d'acides fulviques alors que pour le reste des points, le maximum n'est que 0,115 % de C d'acides humiques et de

0,142 % de C d'acides fulviques dans le point 7 correspondant à un FLUVIOSOL de texture très argileuse (tableau 3).

La proportion d'acides fulviques est plus élevée que celle des acides humiques dans les points 2, 3, 4, 6 et 7 soit dans la moitié des échantillons situés tous dans la partie élevée de la plaine. A l'amont et dans les trois derniers points de la coupe, les acides humiques sont à teneurs plus élevées. Cette répartition permet de constater qu'il y a plus d'acides humiques soit dans les points à forte teneur en matière organique (1) soit dans ceux où les caractères des sols sont vertiques.

La somme des acides fulviques et humiques ne représente qu'une faible proportion de la matière organique totale sauf dans le point 1 où elle est de 42,8 % et dans le point 7 où elle est de 32 % (tableau 3). Ces deux points se caractérisent par une forte teneur en matière organique pour le premier et par une fraction argileuse dépassant les 50 % pour le second. Pour les autres points, elle varie entre 7,7 % pour le point 4 (FLUVIOSOL du cône de déjection) et 25,1 % pour le point 6 (CALCOSOL). De telles proportions font que la matière organique résiduelle insoluble dans les extractifs alcalins et acides employés est dominante. Elle serait en majorité constituée d'humine ayant diverses origines (héritée par transformation incomplète de la lignine, de néosynthèse microbienne et de polycondensation) et d'acides humatomes (Chamayou et Legros, 1989).

Tableau 3 - Teneurs (%) des sols en C des acides fulviques et humiques et leur rapport avec le carbone total.**Table 3** - Soils contents (%) in C of fulvic and humic acids and their relationship with the total carbone.

Points	Type de sol	C org total %	C(AF) %	C(AH) %	C humine %	C(AF)/C %	C(AH)/C %	AH/AF	C(AF+AH) % Corg total
1	RENDOSOL	4,31	0,245	1,601	2,464	5,7	37,1	6,53	42,8
2	CALCOSOL érodé	0,626	0,033	0,020	0,573	5,3	3,2	0,61	8,5
3	COLLUVIOSOL	0,796	0,115	0,027	0,654	14,4	3,4	0,23	17,8
4	FLUVIOSOL	0,758	0,035	0,023	0,7	4,6	3,0	0,66	7,7
5	FLUVIOSOL	0,893	0,034	0,134	0,725	3,8	15,0	3,94	18,8
6	CALCOSOL	0,836	0,131	0,079	0,626	15,7	9,4	0,60	25,1
7	CALCOSOL	0,804	0,142	0,115	0,547	17,7	14,3	0,81	32,0
8	CALCOSOL	0,737	0,031	0,105	0,601	4,2	14,2	3,39	18,5
9	TOPOVERTISOL	0,713	0,028	0,056	0,629	3,9	7,9	2,00	11,8
10	CALCOSOL	0,828	0,005	0,095	0,728	0,6	11,5	19,00	12,1
Moyenne sans P1		0,77	0,06	0,07	0,64	7,86	9,17	3,47	17,02
Ecart-type sans P1		0,08	0,05	0,04	0,06	6,32	5,03	5,97	8,00
CV % sans P1		10,24	84,59	59,07	10,10	80,43	54,83	172,09	46,99

Le niveau de maturité de la matière organique humifiée peut être exprimé par le rapport Acides humiques/Acides fulviques qui indique une faible maturité si sa valeur est < 1 et une forte maturité s'il est $> 1,3$ (Francou, 2003). Les points 2, 3, 4, 6 et 7 se caractérisent par un niveau de maturité faible et même très faible pour le point 3. A l'inverse, les points 1, 5, 8, 9 et 10 sont à matière organique à haut niveau de maturité. Tous ces sols sont carbonatés et le calcaire devrait inhiber la maturité des substances humiques en saturant tôt par le calcium les fonctions actives des acides fulviques, mais certains points échappent à cette règle et ce sont surtout ceux ayant le rapport C des acides fulviques/C total présentant des valeurs relativement plus élevées : COLLUVIOSOL du point 3 et les FLUVIOSOLS des points 6 et 7.

Corrélations entre les divers paramètres

Les tests de corrélation établis entre les paramètres relatifs aux fractions colloïdales organiques et minérales ont surtout exprimé des relations étroites entre les composants de la fraction organique et la quasi-absence de liens avec les minéraux argileux. En effet, les valeurs hautement significatives des coefficients de détermination R^2 et de corrélation r à 8 degrés de liberté (ddl) ont été établies entre :

- d'une part acides humiques, résidus non extractibles (humine) et la somme des acides fulviques et humiques ;
- et d'autre part le carbone organique total (tableau 4).

La relation entre acides fulviques et carbone organique total est aussi significative mais au seuil de 0,01 seulement. La valeur

de r entre acides fulviques et acides humiques est significative au seuil 0,05 ce qui explique que le milieu, malgré sa richesse en carbonates de calcium, n'a pas favorisé la genèse de l'une ou l'autre de ces deux substances humiques puisque les acides fulviques sont censés être plus abondants du fait de la neutralisation précoce de leurs fonctions acides par le calcium fourni par le calcaire (Chamayou et Legros, 1989 ; Duchaufour, 1991).

Pour la relation argile-CEC, elle n'a pas été significative pour deux raisons essentielles ;

- Pour le point 1, la CEC est essentiellement induite par les colloïdes organiques très représentés dans ce RENDOSOL.
- Pour le point 7, très argileux, le cortège minéralogique ne contient pas de smectites et est essentiellement constitué d'illite et de kaolinite, minéraux à faible CEC.

En écartant ces deux points (1 et 7), le coefficient de corrélation r atteint 0,758 et la relation entre ces deux variables devient significative au seuil 0,05 (tableau 4).

Ceci mène vers une conclusion déjà connue : ce n'est pas la quantité d'argile granulométrique qui agit positivement ou négativement sur la CEC du sol mais celle-ci dépend beaucoup plus de la nature minéralogique des argiles.

Les écarts de C organique par rapport aux valeurs seuils et les risques de battance

Dans le but d'exploiter les données disponibles et de les comparer à des résultats proposés pour des zones similaires (Autfray *et al.*, 2009), on a appliqué les formules du seuil critique ($C_{critique}$) de carbone organique et du risque de battance R ci-

Tableau 4 - Corrélations plus ou moins significatives entre les paramètres quantifiés.**Table 4** - More or less significant correlations between the quantified parameters.

Paramètres corrélés	Equation	R ²	r	Seuil de signification à 8 (n-2) ddl
Corg % - Argile %	$y = -0,0365x + 2,3282$	0,1476	-0,384	NS
Corg % - (A+LF) %	$y = -0,0485x + 4,3152$	0,3769	-0,614	NS
AF % - Corg %	$y = 0,0525x + 0,0209$	0,5993	0,774	0,01
AH % - Corg %	$y = 0,4315x - 0,26$	0,9959	0,998	0,001
Humine % - Corg %	$y = 0,5144x + 0,246$	0,9921	0,996	0,001
(AF+AH) %-Corg %	$y = 0,484x - 0,2391$	0,9913	0,996	0,001
AH % - AF %	$y = 4,8711x - 0,1637$	0,5825	0,763	0,05
Argile % - CEC	$y = 1,1341x - 9,9938$	0,575	0,758	0,05 (6ddl)

Tableau 5 - Estimation du bilan entre restitutions et pertes humiques dans les sols cultivés.**Table 5** - Valuation of balance between humic restitutions and losses in the cultivated soils.

Points	Types de sols	Matière organique %	Poids de MO dans 4000 t.ha ⁻¹ de sol	Pertes (1,5 %) en t/an	Restitutions en t.ha ⁻¹ . an ⁻¹	Bilan annuel t.ha ⁻¹ .an ⁻¹
1	RENDOSOL					
2	CALCOSOL érodé	1,07	42,76	0,64	0,55	-0,09
3	COLLUVIOSOL	1,36	54,48	0,82	0,55	-0,27
4	FLUVIOSOL	1,29	51,72	0,78	0,55	-0,23
5	FLUVIOSOL	1,53	61,37	0,92	0,55	-0,37
6	CALCOSOL	1,43	57,24	0,86	0,55	-0,31
7	CALCOSOL	1,38	55,17	0,83	0,55	-0,28
8	CALCOSOL	1,26	50,34	0,76	0,55	-0,21
9	TOPOVERTISOL	1,22	48,96	0,73	0,55	-0,18
10	CALCOSOL	1,41	56,55	0,85	0,55	-0,30

dessous mentionnées. Le seuil critique de C représente un niveau minimal de carbone organique en dessous duquel la structure du sol se fragilise et les risques de sa dégradation deviennent plus forts à cause de la faible stabilité structurale.

$C_{\text{critique}} = (0,32 \cdot (A+LF) \% + 0,87) / 10$ (Autfray *et al.*, 2009).

Risque de battance $R = [(1,5 \cdot LF \% + (0,75 \cdot LG \%))] / [A \% + 10 \cdot MO \%]$ (Rémy et Marin-Lafèche, 1974)

Les résultats montrent que tous les écarts par rapport au seuil critique de C organique dans les sols cultivés sont négatifs (*tableau 6*). Pour tous ces sols, les réserves organiques sont dans une situation critique puisqu'il faudra restaurer entre 0,9 % (point 5) et 2,13 % (point 3) de carbone organique supplémentaire pour atteindre une situation qui garantirait une protection contre les risques de dégradation et un meilleur potentiel de fertilité donc de production. Avec le rythme actuel de restitution estimé à moins de 550 kg/ha (Jones et Kiniry (1986) in Le Villo *et al* (2001)) par les sous-

produits des récoltes (chaumes et racines) et la minéralisation de la matière organique humifiée évaluée à 1,5 % (Chamayou et Legros, 1987), le bilan annuel est négatif (*tableau 5*). Avec le même mode de culture et dans les mêmes conditions de restitutions humiques, les réserves organiques sont en constant épuisement ce qui aggravera davantage les risques de dégradation.

Pour le risque de battance, les points 1, 5, 6, 7, 8, 9 et 10 sont non battants et correspondent à un RENDOSOL (point 1) et des sols de plaine constitués de FLUVIOSOLS, de CALCOSOLS et de TOPOVERTISOLS (*tableau 6*). Seul le point 4 correspondant à un FLUVIOSOL présente le caractère très battant à cause de sa plus forte richesse en limons fins. La toposéquence n'est pas fortement menacée par la dégradation puisqu'en amont, les risques de battance sont faibles; dans la plaine, la pente très réduite et le caractère en majorité non battant des sols ne favorisent pas le

Tableau 6 - Seuils critiques de C organique et risques de battance R.**Table 6** - Critical thresholds of organic C and battance risks R.

Points	Types de sols	C _{critique} %	Ecart: C _{critique} -C _{org} %	R	Appréciation de R *
1	RENDOSOL	1,41	2,90	0,66	Non battant
2	CALCOSOL érodé	2,22	-1,60	1,56	Peu battant
3	COLLUVIOSOL	2,92	-2,13	1,69	Assez battant
4	FLUVIOSOL	2,44	-1,69	2,29	Très battant
5	FLUVIOSOL	1,79	-0,90	1,22	Non battant
6	CALCOSOL	2,38	-1,55	0,72	Non battant
7	CALCOSOL	2,70	-1,90	0,57	Non battant
8	CALCOSOL	1,79	-1,06	0,71	Non battant
9	TOPOVERTISOL	2,40	-1,69	1,10	Non battant
10	CALCOSOL	2,30	-1,48	1,12	Non battant

* Classes des risques de battance: $R > 2$: sol très battant; $1,8 < R < 2$: sol battant; $1,6 < R < 1,8$: sol assez battant; $1,4 < R < 1,6$: sol peu battant; $R < 1,4$: sol non battant (Rémy et Marin-Lafèche, 1974).

déclenchement de l'érosion hydrique. En effet, aucune trace d'érosion en nappe, par incision linéaire ou par ravinement n'a été observée dans cette plaine alluviale.

DISCUSSION

Les fractions colloïdales actives des sols constituées par les argiles et les matières humiques interviennent dans l'amélioration des propriétés physico-chimiques et dans l'augmentation ou la baisse de la fertilité. Ceci constitue une justification pour les identifier le long d'une toposéquence recoupant divers matériaux et types de sols. Ceux-ci ont varié d'une unité très mince mais humifère sur calcaire dur en amont à d'épaisses couches alluvionnaires argileuses en aval, en passant par une formation encroûtée au niveau de la zone de rupture de pente entre le versant et la plaine.

La diffraction aux rayons X de la fraction fine de ces types de sols a mis en évidence l'abondance de la kaolinite dans tous les points prélevés, avec une variation de la présence des illites et des smectites. Les illites sont plus abondantes au milieu de la toposéquence, dans les FLUVIOSOLS et les CALCOSOLS. Les smectites se concentrent plus dans l'unité encroûtée et les sols présentant des caractères vertiques (avec un peu de chlorite) à l'aval de la toposéquence. Des interstratifiés illite-smectite sont repérés au milieu de la plaine tandis que ceux de l'illite-chlorite se répartissent au milieu et à l'aval de la toposéquence. Les smectites du sol encroûté situé au piémont seraient héritées par altération et remaniement des formations superficielles (CALCOSOL érodé). En aval, elles se concentrent et pourraient résulter d'une transformation à partir des illites et des interstratifiés illite-smectite. La perte progressive de K,

cation interfoliaire des illites, par l'intensification des cultures et son remplacement par des cations comme le calcium rendraient les espaces interfoliaires plus hydratables et l'argile changerait de comportement pour évoluer en beidellite. Le processus inverse consistant en la pénétration de K, libéré par les chaumes, dans les espaces interfoliaires des argiles, provoquant une illitisation de celles-ci a été déjà démontré (De Boissezon, 1988); l'évolution inverse par perte de K et fixation de Ca serait aussi possible. Ceci a été, en effet, constaté dans d'autres régions sous climat semi-aride en Iran (Owliaie *et al.*, 2006) et sous climat tempéré (Hubert, 2008).

L'irrégularité de la composition des sols en phyllosilicates a fait que la corrélation de la fraction argileuse avec la CEC a été non significative. On attribue ce résultat particulier au fait que dans le point le plus argileux (point 7), la CEC n'a été que de 22,9meq/100 g et ce, à cause de l'absence de smectite et l'abondance de la kaolinite et des illites. En outre, dans le point de l'amont le plus pourvu en carbone organique, la CEC devrait dépendre exclusivement de la matière organique, en l'absence presque totale d'argiles minéralogiques. Ainsi la CEC normalement fortement liée à la fraction argileuse en présence de proportions modérées de matière organique (Djili et Daoud, 2001), ne l'est, dans le cas de cette toposéquence, qu'en écartant les deux points à valeurs extrêmes en C organique (point 1) et en pourcentage d'argile de type illitique essentiellement (point 7).

Concernant le rôle des argiles dans la fixation et la maturation des matières humiques, les résultats obtenus permettent de constater que la relation entre la fraction argileuse et le carbone organique total n'est pas significative; cependant avec la somme A+LF, le coefficient de corrélation r

bien qu'étant négatif s'améliore nettement; il passe en effet de -0,384 à -0,614.

Pour la répartition latérale de la matière organique, le contraste constaté par certains auteurs entre sols cultivés appauvris en matière organique et sols non travaillés (Chevalier, 1999; Jolivet, 2000) est net pour cette étude. Ceci est à l'origine d'un fort coefficient de variation des teneurs en C organique de la toposéquence.

Bien qu'il n'ait pas été possible d'établir une corrélation significative entre teneurs en calcaire et acides fulviques, on a cependant constaté que la proportion d'acides fulviques par rapport aux acides humiques semble augmenter en présence de fortes teneurs en CaCO_3 (points 2, 3 et 7). La forte accumulation de carbone organique favorise la maturation des matières humiques; en effet, le rapport AH/AF a été élevé à l'amont de la toposéquence sous végétation naturelle et en sol non cultivé. Dans les FLUVIOSOLS, le niveau de maturation reste en général inférieur à 1, mais il a tendance à augmenter dans les sols de l'aval de la toposéquence où s'étendent des TOPOVERTISOLS et des CALCOSOLS plus riches en smectites. On doit par ailleurs insister sur le fait que dans les sols cultivés, la proportion d'acides fulviques est faible par rapport aux résidus organiques constitués essentiellement par l'humine. Ceci s'explique soit par le rôle du calcium qui inhibe d'une façon prématurée la décomposition de la lignine évoluant dans ces conditions en humine héritée, soit par une minéralisation secondaire qui affecterait d'une manière préférentielle la fraction des acides fulviques et humiques. Dans les CALCOSOLS vertiques, cette fraction d'acides fulviques et humiques est supérieure à celle des autres unités de sols, surtout au milieu de la plaine. On ne doit pas laisser inaperçues les fortes corrélations existant entre le carbone organique total et les différentes fractions composant les matières humiques. En effet, toutes les corrélations ont été très hautement significatives (seuil 0,001) sauf celle des acides fulviques qui l'a été dans le seuil 0,01. Ce résultat signifie que les variations des teneurs en matière organique totale sont suivies proportionnellement de celles des toutes les fractions qui la composent.

Les faibles réserves de carbone organique de ces sols carbonatés et à texture fine et très fine pour la plupart peuvent constituer une déficience au niveau de la stabilisation de la structure. La situation n'est cependant pas très alarmante du fait de l'existence d'une abondante fraction argileuse qui doit assurer le rôle stabilisateur de la structure grâce à l'association de ses particules primaires, en présence d'un excès de calcium, en micro et macro-agrégats. Ainsi le risque de battance estimé par le coefficient de Rémy et Marin-Laflèche (1974) a été en majorité faible. Les risques d'érosion de ces sols ne sont pas envisageables, non seulement à cause de leur composition granulométrique, mais aussi suite à la topographie peu accidentée de la zone. Le seul point se situant

sur le versant à forte pente est protégé par sa forte réserve en matière organique humifiée. Mais c'est le piémont qui se trouve le plus exposé aux risques de dégradation: l'érosion a en effet décapé les horizons de surface mettant à nu l'encroûtement calcaire. Cet endroit nécessite en conséquence l'amélioration de ses réserves en carbone organique pour les porter à un niveau proche de celui du versant. De cette manière, la gestion des sols serait presque parfaite: une protection de l'amont grâce aux fortes réserves organiques et une exploitation agricole de la plaine dont les sols sont naturellement protégés par l'abondante fraction argileuse qu'ils contiennent et par leur faible pente.

Pour la fertilité des sols cultivés, elle est assurée par la fraction argileuse vu son abondance et le pourcentage très modeste de la matière organique. Elle leur procure de fortes valeurs de la CEC et des teneurs souvent élevées en potassium échangeable, outre ses rôles au plan physique en créant et en stabilisant leur structure.

CONCLUSION

Les sols de la toposéquence choisie constituent un exemple représentatif du modelé et de la couverture pédologique des zones céréalières du Nord-Ouest semi-aride de la Tunisie. Les sols se caractérisent d'abord par un fort contraste des teneurs en matière organique entre zones cultivées occupant les basses altitudes et zones abandonnées sous végétation arbustive et herbacée naturelle sur le versant. La teneur en C organique des sols cultivés est assez homogène malgré l'hétérogénéité relative de leurs constituants minéraux. La seule exception apparaît au piémont du relief où l'érosion a mis à nu l'encroûtement calcaire qui est moins pourvu en carbone organique. Ce dernier se concentre beaucoup plus dans la fraction non extractible (humine) qui domine les fractions des acides fulviques et humiques. Elle serait héritée par transformation partielle de la lignine en présence de calcaire qui inhibe sa décomposition plus avancée. Les acides fulviques ne semblent pas jouer des rôles importants dans ces sols et leur teneur diminue avec l'augmentation des smectites.

La répartition latérale des argiles a montré une plus forte concentration des smectites à l'aval de la toposéquence ce qui laisse supposer qu'elles résulteraient d'une transformation à partir de l'illite et de l'interstratifié illite-smectite dans un milieu plus confiné. Cette concentration des smectites coïncide avec une augmentation de la CEC et du niveau de maturation de l'humus illustré par le rapport acides humiques/acides fulviques. La CEC n'a pas montré de relation significative avec la fraction argileuse du fait de la présence dans la toposéquence de deux points à forte accumulation soit de matière organique soit de minéraux argileux peu ou non chargés (illite et kaolinite).

La correction des teneurs en matières organiques des sols cultivés par rapport à certaines normes jugées optimales nécessite des apports exogènes énormes, situation qui semble pratiquement inaccessible avec les conditions actuelles de gestion de ces sols. Leur dégradation n'est cependant pas attendue au vu de leurs fortes teneurs en argile assurant leur stabilité structurale et leur fertilité chimique et aussi grâce à la topographie plane peu favorable au déclenchement de l'érosion hydrique.

BIBLIOGRAPHIE

- Aloui T, 1976. Etude pédologique de la plaine du moyen Miliane. Etude n° 505, Direction des Sols, Ministère de l'agriculture, Tunisie.
- Arrouays D, Kicin JL, Pélissier Ph et Vion I, 1994. Evolution des stocks de carbone des sols après déforestation: Analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique. Etude et gestion des sols, n° 2, 1994, pp. 29-38.
- Association française pour l'étude du sol (AFES), 2008. Référentiel pédologique. Editions Quæ, Versailles, 405 p.
- Autfray P, Guillaume P, Forest F, Chabanne A et Husson O, 2009. Outils de gestion des matières organiques en agriculture de conservation en Tunisie. Résumé d'une communication orale lors de la journée nationale « La gestion du stock organique dans les sols de Tunisie », Le Kef, 4 juin 2009, 10 p.
- Bajanik S, Biely A, Mencik E, Salaj J et Stranik Z, 1968. Carte géologique de la Tunisie, feuille de Zaghuan n° 35 au 1/50000. Département de géologie, Office national des mines, Tunisie.
- Bigorre F, Tessier D et Pedro G, 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, pp. 245-250.
- Blanchart E, Achouak W, Albrecht A, Barakat M, Bellier G, Cabidoche YM, Hartmann C, Heulin T, Larré-Larrouy C, Laurent JY, Mathieu M, Thomas F, Villemin G et Watteau F, 2000. Déterminants biologiques de l'agrégation dans les vertisols des petites Antilles: conséquences sur l'érodibilité. EGS, vol. 7, n° 4, volume spécial, pp. 309-328.
- Boissezon (de) P, 1988. Effets de l'enfouissement de paille de luzerne sur la capacité d'échange d'un sol brun sur limons de plateaux. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXIV, n° 4, pp. 337-339.
- Chamayou H et Legros JP, 1987. Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. ACCT. CITLF-Presses universitaires de France, pp. 173-236.
- Chevalier T, 1999. Dynamique et déterminants du stockage du C dans un vertisol sous prairie (Martinique). Thèse ENSA Montpellier, 162 p.
- CPCS, 1967. Classification des sols, édition 1967, INRA, 96 p.
- CRDA de Zaghuan, 2011. Carte agricole du gouvernorat de Zaghuan.
- Dignac MF, 2007. Des résidus végétaux et composts aux matières organiques des sols: une approche moléculaire et isotopique. HDR - Thèses du département Environnement et agronomie - Inra. www.inra.fr/ea/EA_these/?action=6&PHPSESSID...
- Djili K et Daoud Y, 2001. Relation entre l'argile, la matière organique et la capacité d'échange cationique des sols du Nord de l'Algérie. Agrochimica A. 2001, vol.45, n° 5-6, pp. 248-251.
- Dridi B et Toumi C, 1999. Influence d'amendements organiques et d'apport de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. EGS, vol 6, n°1, pp. 7-14.
- Duchaufour Ph, 1991. Pédologie. Sol, végétation, environnement. Masson, Paris, 35-56.
- Eyheraguibel B, 2004. Caractérisation des substances humiques biomimétiques – Effets sur les végétaux. Thèse ENSA Toulouse, 230 p.
- Francois S, 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 INAPG, 288 p.
- Hubert F, 2008. Modélisation des diffractogrammes de minéraux argileux en assemblages complexes dans deux sols de climat tempéré. Implications minéralogiques et pédologiques. Thèse, Université de Poitiers, faculté des sciences fondamentales et appliquées, 223 p.
- Jolivet C, 2000. Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. Thèse, Université de Bourgogne – INRA Orléans, 313 p.
- Le Villo M, Arrouays D, Deslais W, Daroussin J, Le Bissonnais Y et Clergeot D, 2001. Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaire pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné. Etudes et gestion des sols, volume VIII, 1, pp. 47-63.
- Morel R, 1989. Les sols cultivés, Tec et Doc Lavoisier, Paris, pp. 29-82.
- Mrabet R, Lahlou S, Le Bissonnais Y et Duval O, 2004. Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains. Influence des techniques culturales simplifiées. Bulletin du Réseau Erosion 23 (2), pp. 405-415.
- Naanaa W et Susini J, 1988. Méthodes d'analyse physique et chimique des sols. ES 252, Direction des sols, ministère de l'agriculture et de l'environnement, Tunisie, 118 p.
- Naman F, Soudi B et Chiang C, 2001. Impact de l'intensification agricole sur le statut de la matière organique des sols en zones irriguées semi-arides du Maroc. EGS vol 8, n° 4, pp. 269-277.
- Rémy JC et Marin-Laflièche A, 1974 - L'analyse de terre: réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Ann. Agron., 1974, 25(4), pp. 607-632.
- Owliaie H, Abtahi A, Kormali F and Baghernejad M, 2006. Origin and distribution of clay minerals of semi-arid soils of Kohgilouye Boyerahmad province, southwestern Iran. 18th World Congress of Soil Science. July 9-15 2006, Philadelphia, Pennsylvania, USA. a-c-s.confex.com/crops/wc2006/techprogram/P14957.HTM
- Thuriès L, Arrufa A, Dubois M, Feller C, Herrmann P, Larré-Larrouy M-C, Martin C, Pansu M, Rémy J-C et Viel M, 2000. Influence d'une fertilisation organique et de la solarisation sur la productivité maraîchère et les propriétés d'un sol sableux sous abri. EGS, vol. 7, n°1, 2000, pp. 73-88.