

Comportement physique et propriétés des TOPOVERTISOLS de la région semi-aride de la Tunisie

H. Ben Hassine^(1*), M. Bouraoui⁽¹⁾, M. Ben Youssef⁽¹⁾ et C. Zidi⁽²⁾

- 1) Université de Carthage, Ecole supérieure d'agriculture de Mograne, 1121, Mograne, Tunisie
- 2) Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie

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

RÉSUMÉ

Afin d'approfondir les connaissances sur l'un des sols les plus aptes à la production de cultures annuelles pluviales en Tunisie et en vue d'étudier son comportement vis-à-vis de la rétention en eau, cinq vertisols topomorphes (TOPOVERTISOLS) dont quatre sont situés dans la vallée de l'oued Miliane (Nord-Est de la Tunisie), ont été échantillonnés par tranches de 20 cm sur un mètre de profondeur. Des analyses physico-chimiques ont permis de caractériser la granulométrie, les teneurs en matières organiques et la capacité d'échange cationique. Des échantillons ont été soumis à une analyse du retrait afin de mieux connaître la répartition de l'eau en fonction des différentes composantes de la structure du sol.

Les résultats obtenus confirment l'abondance de la fraction argileuse, la réaction alcaline des solutions, la salinité négligeable et la plus forte richesse des horizons supérieurs en matière organique, malgré des teneurs relativement modestes dans l'ensemble. La capacité d'échange cationique dépasse souvent 30 cmol.kg^{-1} . La caractérisation du retrait a été discutée sur la base de la connaissance des types d'eaux retenues dans les différents pores (vides) qui se répartissent en eau interpédique (inter-agrégats), structurale (intra-agrégats), plasmique (au sein de la masse d'argile) et résiduelle (adsorbée sur les surfaces des argiles). En premier lieu, la variation de volume des sols consécutive à l'humectation-dessiccation est importante et donc compatible avec les structures vertiques décrites in-situ. L'analyse de la courbe de retrait permet d'identifier des points singuliers spécifiques à différents types d'eau et d'organisation du sol. Des relations statistiques ont pu être établies entre la capacité d'échange et l'eau de la fraction argileuse au sens granulométrique. Cette dernière détermine largement les propriétés aux différents points singuliers de la courbe de retrait. On peut alors accéder à l'eau utile pour la végétation avec l'avantage d'être obtenue sur des échantillons macroscopiques et non sur de la terre tamisée. Ces vertisols confirment leur statut de réservoirs d'eau pour les cultures annuelles et leur richesse chimique par les fortes proportions de sites d'échange offerts par les colloïdes argileux. Leur faible teneur en matières organiques, qui devraient donner davantage de stabilité à la structure, constitue le point faible pour de tels types de sols. L'abondance des argiles et la présence de carbonates atténueraient cependant ce déficit et favoriseraient la stabilité des agrégats.

Mots clés

Vertisols, analyses, argiles, matières organiques, courbes de retrait, teneurs en eau, réserve utile, régression.

SUMMARY**PHYSICAL BEHAVIOR AND PROPERTIES OF TOPOVERTISOLS OF THE SEMI-ARID REGION OF TUNISIA**

In order to deepen the knowledge on one of soil types which is the best suitable for the production of rainfed annual crops and to study their behavior towards the water retention, five plain's vertisols (TOPOVERTISOLS), of which four are located in the oued Miliane valley (North-East of Tunisia), were sampled in thicknesses of 20 cm on one meter deep. Physicochemical analyzes have characterized the particle size, the organic matter contents and the cation exchange capacity. Samples were subjected to analysis of shrinkage to better understand the water distribution according to the different components of the soil structure.

Results obtained confirm the abundance of the clay fraction, the alkaline reaction of solutions, the negligible salinity and the greatest contents of organic matter in the upper horizons, despite relatively low levels on the whole. The cation exchange capacity almost exceeds 30 cmol.kg⁻¹. Shrinking characterization has been discussed on the basis of knowledge of water types retained in the various pores (voids) which are divided into interpedic water (inter-aggregate), structural (intra-aggregate), plasmic (in the mass of clay) and residual (adsorbed on the clays surfaces). First, the soil volume change, consequent of wetting-drying, is important and therefore compatible with vertic structures described in-situ. Analysis of the shrinkage curve identifies specific singular points for different types of water and soil organization. Statistical relationships have been established between the cationic exchange capacity and the water in the clay fraction. This fraction largely determines the properties of the various singular points of the shrinkage curve. We can so access the available water to the vegetation with the advantage of being obtained over macroscopic samples and not on the sieved soil. These vertisols confirm their status as water reservoirs for annual crops and their chemical richness by the high proportions of exchange sites offered by clay colloids. Their low content of organic matter that should give greater stability to the structure is the weak point for such types of soils. The abundance of clays and the presence of carbonates would, however, reduce the deficit and promote the stability of aggregates.

Key-words

Vertisols, analyses, clays, organic matter, shrinkage curves, water contents, useful reserve, regression curves.

RESUMEN**COMPORTAMIENTO FÍSICO Y PROPIEDADES DE LOS TOPOVERTISOLES DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA DE TÚNEZ**

Para profundizar los conocimientos sobre uno de los suelos más aptos a la producción de cultivos anuales de secano en Túnez y para estudiar su comportamiento con respecto a la retención en agua, cinco vertisoles topomorfos (TOPOVERTISOLES) cuyos cuatro son situados en el valle del Oued Miliane (Noreste de Túnez), se recogieron muestras por capas de 20 cm sobre un metro de profundidad. Análisis físico-químicos permitieron caracterizar la granulometría, los contenidos en materias orgánicas y la capacidad de intercambio catiónico. Se sometieron muestras a un análisis de la contracción para conocer mejor la repartición del agua en función de los diferentes componentes de la estructura del suelo.

Los resultados obtenidos confirman la abundancia de la fracción arcillosa, la reacción alcalina de las soluciones, la salinidad insignificante y la riqueza más elevada en materia orgánica de los horizontes superiores, a pesar de contenidos relativamente modestos en conjunto. La capacidad de intercambio catiónico supera a menudo 30 cmol.kg⁻¹. Se discutió la caracterización de la contracción sobre la base del conocimiento de los tipos de aguas retenidas en los diferentes poros (vacíos) que se reparten en agua interpédica (inter-agregados), estructural (intra-agregados), plásmica (al seno de la masa de arcilla) y residual (adsorbida sobre las superficies de las arcillas). En primer lugar, la variación de volumen de los suelos consecutiva a la humectación – desecación es importante y luego compatible con las estructuras vérticas descritas in situ. El análisis de la curva de contracción permite identificar puntos singulares específicos para diferentes tipos de agua y de organización del suelo. Se establecieron relaciones estadísticas entre la capacidad de intercambio y el agua de la fracción arcillosa en el sentido granulométrico. Esta última determina largamente las propiedades a los diferentes puntos singulares de la curva de contracción. Se puede entonces acceder al agua útil para la vegetación con la ventaja de ser obtenida sobre muestras macroscópicas y no sobre tierra tamizada. Estos vertisoles confirman su estatuto de depósito de agua para los cultivos anuales y su riqueza química gracias a las grandes proporciones de sitios de intercambios ofrecidos por los coloides arcillosos. Su bajo contenido en materia orgánica que debería dar más de estabilidad a la estructura, constituye el punto débil para tales tipos de suelos. La abundancia de arcillas y la presencia de carbonatos atenuarían sin embargo este déficit y favorecerían la estabilidad de los agregados.

Palabras clave

vertisoles, análisis, arcillas, materias orgánicas, curvas de contracción, contenido en agua, reserva útil, regresión.

Les vertisols couvrent en Tunisie une surface de 710 000 ha (Mtimet, 1999) et s'étendent particulièrement dans les vallées inter-montagneuses du nord de la Dorsale, du haut Tell et dans les plaines de Hédhil et Mateur-Ichkeul ainsi que sur les formes collinaires de la région de Béja. Ils ont aussi été identifiés en zones arides côtières et continentales au sud de la Dorsale (Belkhouja *et al.*, 1973). Ils constituent un excellent milieu de production céréalière au vu de leurs propriétés physico-chimiques leur conférant les fonctions de réservoirs d'eau et de sources de nutriments pour les cultures annuelles.

Afin de mieux en comprendre les propriétés et les comportements, nous allons discuter de leurs différentes caractéristiques, à savoir l'abondance et la qualité des minéraux argileux gonflants, le rôle de la matière organique, les caractéristiques analytiques en relation avec les propriétés physiques, prenant comme point de départ la technique d'étude du retrait développée et mise au point en Tunisie par Braudeau (1988; 1995; 2001). À partir du modèle de retrait structural du sol (modèle MRS) développé par Braudeau (2001), on peut distinguer dans le sol deux grands types de volumes poreux élémentaires, respectivement un volume macroporal à l'échelle de la structure

du sol, et un volume microporal correspondant à celui de la phase argileuse. Cette approche va nous permettre d'établir et de corrélérer différents paramètres des sols (constitution, caractéristiques physico-chimiques) afin d'en évaluer les propriétés.

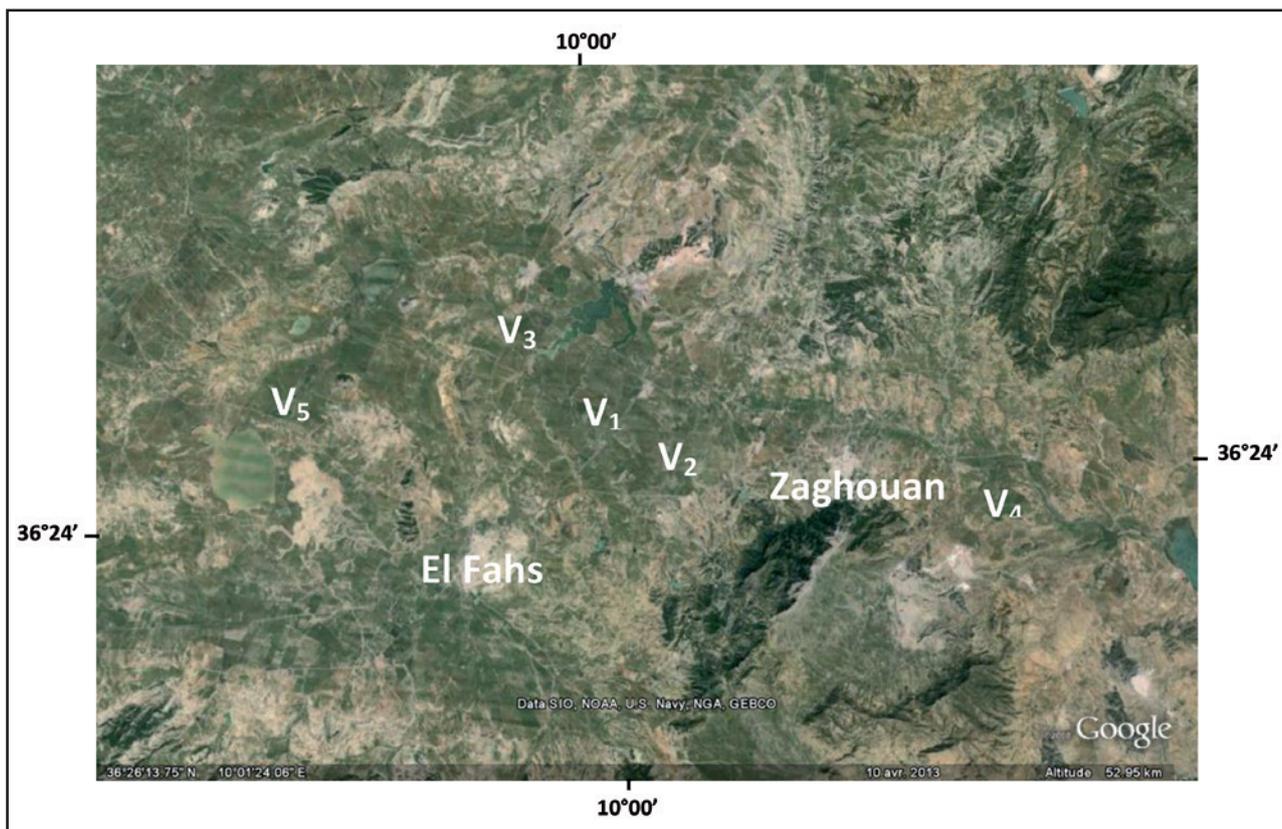
MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sites de prélèvement

Les vertisols échantillonnés sont situés au nord du mont Zaghouan sous un climat semi-aride à étage moyen à supérieur; trois parmi eux se localisent dans la plaine du Miliane. Ils sont en l'occurrence: V1 (Sminja), V2 (Mograne), V3 (Bir Mcharga), V4 (vallée de l'oued Rmel à l'est de Zaghouan), enfin le cinquième V5 est implanté à l'ouest de la ville d'El Fahs, près du lac salé de Sebkhia El Kourzia. Ces vertisols présentent des surfaces planes, à pentes faibles leur conférant le qualificatif « topomorphes » ou « à drainage externe nul ou réduit » (CPCS, 1967). Ce sont des TOPOVERTISOLS cultivés (AFES, 2008) formés aux dépens de dépôts alluviaux carbonatés récents. Leur

Figure 1 - Localisation des 5 vertisols sur une image de Google Earth.

Figure 1 - Location of the 5 vertisols on a Google Earth image.



fissuration superficielle à l'état sec et leur couleur sombre constituent les caractères apparents les plus évidents pour les identifier et les localiser.

Les prélèvements ont été réalisés à la tarière, sur un mètre de profondeur, à raison d'un échantillon tous les 20 cm, soit 5 échantillons par point et 25 échantillons au total.

Analyses physico-chimiques

(Naanaa et Susini, 1988)

Le pH a été mesuré au pH-mètre sur une suspension sol/eau = 1/2,5. La conductivité électrique a été mesurée sur un extrait de pâte saturée à 25 °C. Le CaCO_3 total a été déterminé avec la méthode du calcimètre de Bernard et le CaCO_3 actif par extraction à l'oxalate d'ammonium et dosage en retour par manganimétrie (méthode Drouineau). La composition granulométrique a été déterminée avec la méthode de sédimentation utilisant la pipette de Robinson. La teneur en matière organique a été mesurée par: extraction de C organique total (COT) par l'attaque sulfochromique à froid (Walkley et Black) et dosage colorimétrique à 600 nm de longueur d'onde: matière organique = C organique * 1,724. Les sols contenant des carbonates, la mesure de la capacité d'échange cationique (CEC) a été réalisée par percolation d'une solution normale de NaCl, lavage à l'alcool. Après une nouvelle percolation par une solution d'acétate d'ammonium 1 N à pH = 8,2, Na a été dosé dans le filtrat par photométrie de flamme.

Analyses du retrait

Afin de comparer les échantillons entre eux, nous avons fait le choix d'étudier les propriétés des sols sur des échantillons remaniés et préparés de manière standardisée. Les échantillons

ont été broyés, tamisés à 2 mm et légèrement humectés puis disposés dans leurs supports, avant d'être compressés manuellement suivant un protocole identique: même méthode de remplissage et nombre de coups de compression similaire pour tous les supports. Leur densité apparente atteint des valeurs proches de celles du sol *in situ* ou d'un échantillon non perturbé et permet de les comparer sur des bases similaires. Il est à noter que sur des horizons superficiels cultivés (0-25 cm), les densités obtenues ont un sens par rapport au terrain.

Après leur humectation sur un bain de sable, les échantillons ont été placés par groupes de 8 (figure 2), sur un plateau tournant

Figure 2 - Schéma général de l'étuve enveloppant l'unité rétractométrique.

Figure 2 - Schematic representation of the oven containing the shrinkage measuring unit.

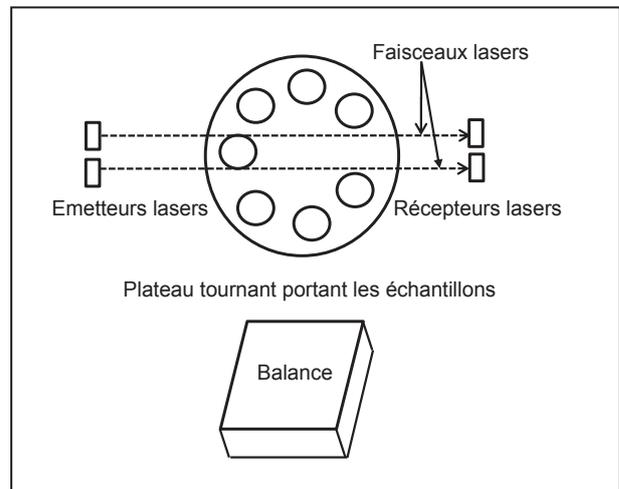


Figure 3 - Courbe de retrait standard d'un échantillon de sol remanié (Zidi et Braudeau, 1998 ; Braudeau, 2001).

Figure 3 - Standard shrinkage curve of a disturbed soil sample (Zidi and Braudeau, 1998; Braudeau, 2001).

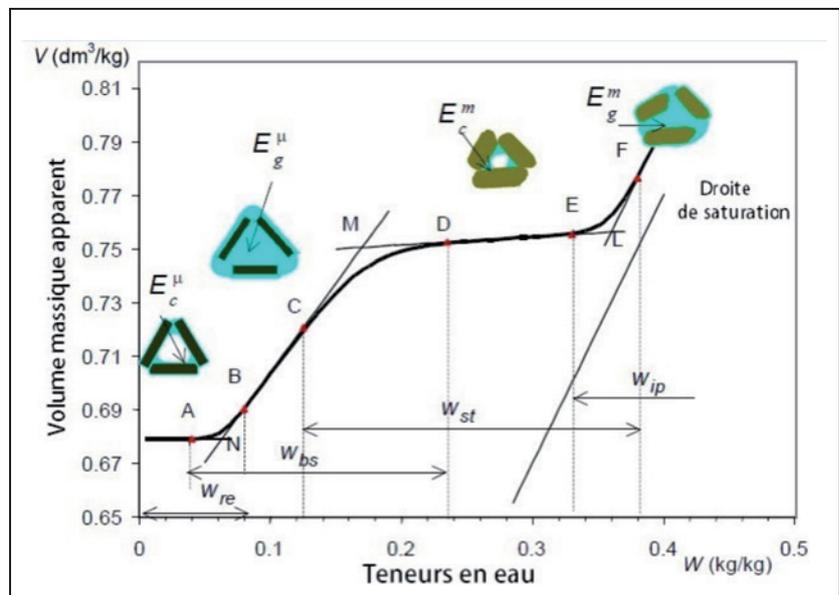


Tableau 1 - Résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des horizons des vertisols étudiés.
Table 1 - Analysis results of the physicochemical parameters of the horizons of the studied vertisols.

VERTISOL	Prof. cm	Granulométrie %					CaCO ₃ %		pH	DA	CE 25°C mS.cm ⁻¹	Corg %	Ntot %	C/N	CEC cmol.kg ⁻¹
		A	LF	LG	SF	SG	Total	Actif							
V ₁	0-20	51,5	37,4	4,8	4,9	1,4	26,88	17	8,5	1,33	0,54	0,72	0,17	4,24	27,68
	20-40	47,4	38,5	8	5	1	26,88	20	8,47	1,38	0,36	0,69	0,14	4,93	26,91
	40-60	49	31,2	14,5	4,4	1	27,36	17	8,46	1,41	0,29	0,68	0,08	8,5	33,46
	60-80	56	32,7	4,8	5,3	1,2	31,68	17,5	8,5	1,41	0,48	0,57	0,07	8,14	33,84
V ₂	80-100	44,4	30,2	19,2	5	1,3	22,08	16	8,83	1,38	0,26	0,56	0,09	6,22	33,84
	0-20	48,4	24,2	5,5	16,4	5,5	26,88	16	8,67	1,38	0,34	0,86	0,08	10,75	34,5
	20-40	25,5	35,5	8,9	15,1	5	19,2	12,5	8,47	1,58	0,35	0,69	0,11	6,27	38,85
	40-60	58,8	9,8	9,8	15,2	6,4	21,4	12	8,14	1,42	0,33	0,75	0,14	5,36	33,84
V ₃	60-80	44,4	28,2	13,3	12,8	1,3	20,95	13,5	8,25	1,43	0,38	0,69	0,05	13,8	38,46
	80-100	51,8	25,9	0	14,3	8	18,24	15	8,04	1,45	0,35	0,62	0,13	4,77	35
	0-20	43,8	9,7	0	34,4	12,1	7,68	0	8	1,38	0,67	1,04	0,14	7,43	28,45
	20-40	40,7	13,6	4,5	31,7	9,5	9,6	0	8,47	1,4	0,37	0,85	0,12	7,08	23,06
V ₄	40-60	36,2	9	9,1	38,2	7,5	9,6	0	8,07	1,35	0,2	0,77	0,07	11	17,67
	60-80	37	4,6	9,4	40,2	8,7	11,52	7	8,4	1,4	0,21	0,75	0,06	12,5	23,12
	80-100	32,5	0	17,8	36,2	13,5	7,68	0	8,36	1,41	0,27	0,64	0,04	16	18,09
	0-20	36,5	32	9,1	16,9	5,5	22,85	17,5	8,19	1,33	0,61	1,03	0,13	7,92	48,57
V ₅	20-40	30,2	35,2	5	18,3	11,3	20,16	14	8,22	1,45	1,09	0,94	0,12	7,83	28,74
	40-60	37,8	33,1	9,4	14,4	5,3	24,96	11,5	8,23	1,41	0,3	0,78	0,12	6,5	37,92
	60-80	48,1	28,9	4,8	13,1	5,1	22,08	18	8,62	1,42	0,65	0,55	0,04	13,75	36,44
	80-100	40	35	10	11,6	3,4	24	18,5	8,4	1,44	0,65	0,53	0,04	13,25	34,96
V ₅	0-20	59,2	4,6	9,1	21,4	5,8	17,28	15	8,13	1,31	0,5	1,06	0,21	5,05	33,18
	20-40	29	19,3	4,8	23,3	23,6	15,36	14,5	8,29	1,42	0,26	0,8	0,09	8,89	24,89
	40-60	36	18	13,5	20,3	12,2	9,6	0	8,31	1,4	0,52	0,62	0,12	5,17	32
	60-80	39,4	24,7	4,9	20,6	10,4	9,6	0	8,19	1,35	0,47	0,58	0,08	7,25	33,48
80-100	45,4	45,5	0	2,1	7	19,2	12,5	8,28	1,31	0,37	0,55	0,07	7,86	34,37	

A : argile; LF : limon grossier; SF : sable fin; SG : sable grossier; DA : densité apparente; Corg : carbone organique; Ntot : azote total; CEC : capacité d'échange cationique.
 A : clay; LF : fine silt; LG : coarse silt; SF : fine sand; SG : coarse sand; DA : bulk density; Corg : organic carbon; Ntot : total nitrogen; CEC : cationic exchange capacity.

exposé à des faisceaux de rayons lasers qui mesurent leurs variations de géométrie au cours de leur assèchement à 28-30 °C, jusqu'à atteindre l'équilibre avec l'air ambiant (72 heures au maximum). Leur humidité est suivie en continu à partir de leur variation de poids mesurée par la balance.

L'appareil utilisé est celui décrit par Zidi et Braudeau (1998). Le schéma de la *figure 2* résume brièvement la technique de fonctionnement du « rétractomètre » utilisé.

La courbe de retrait standard est illustrée par la *figure 3*. Elle comprend différentes phases qui ont été analysées en détail par Braudeau (2001) et que nous discuterons plus loin. Néanmoins, la partie F-E de la courbe qui correspond à une porosité macroscopique d'origine biologique ou liée à des structures macroscopiques (travail du sol, fissures de retrait) n'a pas ici d'existence réelle car établie sur des échantillons comprimés mécaniquement.

RÉSULTATS

Les résultats analytiques, portés sur le *tableau 1*, montrent que les cinq profils sont carbonatés avec des teneurs en CaCO_3 total pouvant dépasser les 20 % dans V1, V2 et V4. Le profil V3 contient le moins de calcaire avec 7,7 à 11,5 % et celui d'El Fahs (V5) présente des valeurs intermédiaires variant entre 9,6 et 19,2 %. Le pH du sol est toujours supérieur à 8, ce qui est conforme à l'équilibre calcite-eau (pH ~ 8,3). La conductivité électrique est partout faible et ne dépasse jamais 1 mS.cm^{-1} , ce qui signifie que ces sols n'ont subi ni d'apports d'eau, du fait que les eaux d'irrigation sont en partie salées dans cette région, ni des contaminations par des niveaux d'eau souterrains salés.

Composition granulométrique

Des teneurs en argile de 50 % sont observées dans les sites de Sminja (V1), de Mograne (V2) et d'El Fahs (V5). Le profil le moins pourvu en argile est celui d'oued Rmel (V4), avec des teneurs comprises entre 30,2 et 37,8 % dans les horizons superficiels. La fraction la plus abondante après l'argile est celle des limons, à l'exception du profil V3 (Bir Mcharga) où les sables constituent une proportion relativement importante. Dans le profil V5, l'horizon de surface est plus enrichi en argile, ce qui serait dû soit à un apport en nappe latéral d'argile ou à une hétérogénéité provoquée par anthropomorphisation puisque ce sol est cultivé.

Teneurs en carbone organique

La teneur en carbone organique est généralement plus importante dans les horizons superficiels, avec des valeurs variant entre 0,56 % pour V1 et 1,06 % pour V5. Elle a tendance à diminuer progressivement avec la profondeur, mais ses

valeurs ne sont pas négligeables même dans l'horizon le plus profond (*tableau 1*). Ceci serait dû au processus d'isohumisme caractérisant les milieux semi-arides à saisons contrastées (Duchaufour, 1977; Boulaïne, 1975), mais aussi et fort probablement, aux mouvements de retournement affectant les vertisols de sorte que la matière organique des horizons superficiels peut se retrouver en profondeur par migration des particules dans les fentes de retrait pendant la saison sèche.

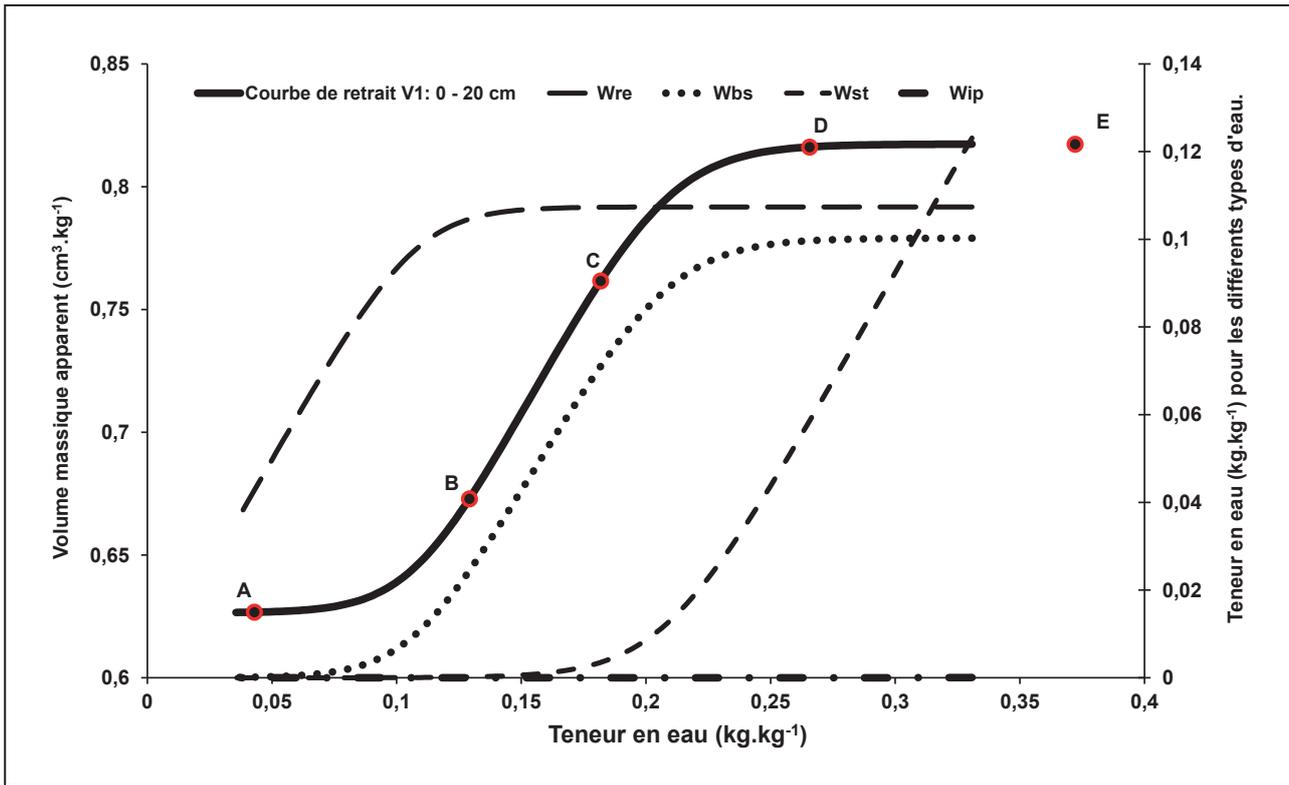
Capacité d'échange cationique

Les valeurs des capacités d'échange cationique varient dans l'horizon de surface entre 28,45 cmol.kg^{-1} pour V3 qui présente la plus forte fraction sableuse et 48,57 cmol.kg^{-1} pour le profil V4 (*tableau 1*). Ces valeurs reflètent l'un des caractères spécifiques des vertisols qui est leur richesse en argiles gonflantes (smectites) à fortes capacités d'échange cationique. Le vertisol V3, où la texture est argilo-sableuse, présente les CEC les plus basses avec 17,67 cmol.kg^{-1} au niveau de 40-60 cm et 18,09 cmol.kg^{-1} dans l'horizon le plus profond.

Partant du fait que la CEC intègre les caractéristiques cumulées en constituants fins que sont les argiles, les oxydes et les matières organiques (Bigorre, 2000), une corrélation multiple a été établie entre CEC d'une part et teneurs (%) en argile et en matière organique d'autre part. L'équation obtenue est la suivante: $\text{CEC (cmol.kg}^{-1}) = 45,6A + 815,8MO$; $R^2 = 0,951$. Elle permet de distinguer ce qui revient à l'argile au sens minéralogique et à la matière organique, dans la valeur de la CEC. Cette équation reflète une valeur raisonnable pour la CEC de l'argile minéralogique (45,6 cmol.kg^{-1}) dans ces types de sol et qui est cohérente avec les résultats obtenus par Ben Rhaïem *et al.* (1998); elle attribue, en revanche, une valeur très élevée (815,8 cmol.kg^{-1}) pour la matière organique. La faible participation de cette matière organique (2 à 4 cmol.kg^{-1}) à la CEC totale (30 à 40 cmol.kg^{-1}) serait une cause possible de cette surestimation. Il y aurait aussi probablement l'intervention d'autres paramètres qui font éloigner cette CEC de ses valeurs admises dans la littérature (autour de 280 cmol.kg^{-1}): on pense à l'effet du calcaire actif qui aurait une forte réactivité au vu de ses teneurs relativement élevées (*tableau 1*) et de son importante surface de contact.

Densités apparentes

Évaluées après compression d'échantillons perturbés, ses valeurs sont les plus faibles dans l'horizon de surface (1,31 à 1,38), puis plafonnent à 1,45 dans plusieurs horizons sous-jacents (*tableau 1*). Ces valeurs restent ordinaires et indiquent une densification relativement modérée des horizons profonds. Elles tendent à montrer que les horizons superficiels, plus riches en matières organiques, sont moins compressibles ou que les horizons profonds sont naturellement plus denses, ce qui est conforme à la littérature.

Figure 4 - Courbe de retrait de l'horizon (0-20 cm) du profil V1.**Figure 4** - Shrinkage curve of the horizon (0-20 cm) of V1 profile.

Courbes de retrait

Les courbes de retrait peuvent être analysées afin d'identifier différentes composantes de la porosité. Notre but n'est pas de réaliser une étude aussi détaillée que celle décrite par Braudeau (2001). Cependant, il est très utile d'identifier les différentes composantes de la structure et de la porosité du sol pour en déduire des paramètres physiques, par exemple sur la réserve utile du sol ou sur les conditions d'aération et de circulation de l'eau, particulièrement utiles en régions arides. On peut prendre comme exemple la *figure 4*. La courbe brute est celle en gras. Des courbes secondaires dérivées de la courbe expérimentale ont été construites entre les points caractéristiques de la courbe de retrait.

Rappelons que la courbe de dessiccation a été obtenue sur des échantillons préalablement comprimés mécaniquement. On a, au départ, entre E et D, une perte d'eau sans variation de porosité, puis une perte d'eau, entre D et B, avec perte de porosité et enfin une perte d'eau à volume constant correspondant à la limite de retrait. La variation de volume est considérable puisque, en prenant pour référence le volume sec, elle est de 30 % (*figure 4*).

Chacun des intervalles (F-E, E-D, D-C, C-B, B-A) se distingue par l'extraction de différents types d'eau et à la

mise en jeu de différents niveaux d'organisation du sol. Sur nos échantillons broyés, tamisés < 2 mm, comprimés mécaniquement, on retrouve la courbe en « S » caractéristique des sols, décrite par Braudeau (2001) et commune à de plusieurs travaux (Bruand et Prost, 1987; Braudeau et Bruand, 1993) sur le retrait-gonflement des sols (*figure 4*). Ces derniers auteurs montrent en outre, qu'il est possible de déterminer, dans un échantillon massif de sol, la contribution argileuse dans la relation teneur en eau-gonflement.

D'après les travaux précédents, la première phase F-E de dessèchement correspond à l'eau très facilement éliminée, dans les espaces inter-agrégats les plus grands, analogue à l'eau interpèdes d'un sol non remanié. Ensuite l'eau extraite depuis E (37,21 %) jusqu'en D (26,56 %) correspond à la vidange de pores plus petits, compatible avec l'assemblage d'agréats de plus petite taille. On note que la variation de volume est à ce stade quasi nulle ce qui signifie que la géométrie des agrégats et leur assemblage seraient maintenus. De D à C (19,18 %), la variation de volume devient significative, mais reste encore faible, et provoquerait une légère contraction des agrégats eux-mêmes avec perte partielle de l'eau interne à la phase argileuse (Bruand et Prost, 1987; Braudeau et Bruand, 1993). À partir de C jusqu'en B (12,92 %), la pente de la courbe de retrait tend à rejoindre la

Tableau 2- Teneurs en eau pondérales (%) aux différents points de transition (F, E, D, C, B et A) et valeurs des différents types d'eaux (Wst : intra-agrégats), plasmique (Wbs : retenue par la matrice argileuse) et de la réserve utile (RU) pour tous les horizons.

Table 2- Weight water contents (%) at various transition points (F, E, D, C, B and A) and values of structural (Wst : intra-aggregate), plasmic (Wbs : retained by the clayey matrix) waters, and useful reserves (RU), for all horizons.

Horizons (cm)	WF	WE	WD	WC	WB (Wre)	WA	Wst (structurale)	Wbs (plasmique)	RU
V ₁ 0-20	47,17	37,21	26,56	18,18	12,92	4,29	28,99	22,27	13,64
V ₁ 20-40	29,97	29,97	29,58	19,95	13,31	3,75	10,02	25,83	16,27
V ₁ 40-60	44,39	30,06	27,68	22,49	12,23	5,54	21,9	22,14	15,45
V ₁ 60-80	58,75	32,48	29,56	18,71	13,28	5,86	40,04	23,7	16,28
V ₁ 80-100	34,68	26,63	25,61	18,76	14,44	5,1	15,92	20,51	11,17
V ₂ 0-20	34,33	30,01	27,81	17,03	11,03	4,56	17,3	23,25	16,78
V ₂ 20-40	38,11	32,57	30,84	22,39	16,36	8,69	15,72	22,15	14,48
V ₂ 40-60	36,6	27,53	27,05	17,46	12,09	5,78	19,14	21,27	14,96
V ₂ 60-80	39,9	33,29	32,66	20,8	11,59	4,14	19,1	28,52	21,07
V ₂ 80-100	39,69	34,58	33,08	19,17	11,85	4,73	20,52	28,35	21,23
V ₃ 0-20	36,39	27,35	25,93	21,19	7,9	3,5	15,2	22,43	18,03
V ₃ 20-40	36,53	28,73	26,75	15,73	8,74	3,08	20,8	23,67	18,01
V ₃ 40-60	34,77	27,35	24,53	16,72	7,74	3,56	18,05	20,97	16,79
V ₃ 60-80	29,84	26,36	23,48	16,73	8,62	1,16	13,11	22,32	14,86
V ₃ 80-100	33,11	23,59	16,17	10,43	6,82	1,07	22,68	15,1	9,35
V ₄ 0-20	43,17	34,49	31,81	20,69	9,87	3,17	22,48	28,64	21,94
V ₄ 20-40	34,55	26,94	23,83	18,81	9,42	4,21	15,74	19,62	14,41
V ₄ 40-60	41,09	34,04	31,94	18,66	10,28	5,22	22,43	26,72	21,66
V ₄ 60-80	36,66	34,04	29,91	21,13	10,4	5,19	15,53	24,72	19,51
V ₄ 80-100	36,97	31,43	29,19	21,79	11,73	5,35	15,18	23,84	17,46
V ₅ 0-20	38,15	33,93	32,41	20,81	9,47	5,16	17,34	27,25	22,94
V ₅ 20-40	32,23	24,96	21,28	16,21	8,33	3,93	16,02	17,35	12,95
V ₅ 40-60	31,46	29,81	27,76	19,02	9,66	4,64	12,44	23,12	18,1
V ₅ 60-80	33,62	30,61	25,54	16,14	9,01	5,33	17,48	20,21	16,53
V ₅ 80-100	37,01	30,7	27,86	19,77	10,1	2,16	17,24	25,7	17,76

variation de teneur en eau (retrait normal): l'eau extraite provient, comme l'ont montré les auteurs précédents, de la contraction de la matrice argileuse à l'échelle de l'assemblage des particules. Ensuite, de B jusqu'à A, on atteint progressivement une limite de retrait. À ce stade, comme l'ont montré en premier les travaux de Méring (1946) puis de nombreux travaux: synthèse de Sposito et Prost (1982), Tessier (1984) et Ben Rhaiem *et al.* (1987), l'eau est essentiellement liée aux cations échangeables.

L'intérêt du travail de Braudeau (2001), a été de préciser que la partie de la courbe allant du point D au point B est de l'eau utilisable par les plantes. Sa transposition à l'échelle de l'horizon puis du profil peut constituer une approche pertinente de la réserve utile (RU) pour les plantes.

Sur ces bases, nous allons pouvoir analyser les différentes phases de la courbe de retrait en différents types d'eau, et

ensuite établir des corrélations avec la constitution du sol, avec notamment concernant les transitions entre les points singuliers selon Braudeau (2001): WD - WB (RU = Wst + Wbs, partiellement), WD - WC (Wst + Wbs, partiellement) et WB - WA (Wbs + Wre, partiellement). Enfin nous pourrions calculer des réserves utiles pour la totalité des horizons des cinq profils (tableau 2).

On constate une faible variabilité des teneurs en eau aux points D et B pour tous les profils et les horizons sauf pour le profil V3, dans l'horizon le plus profond où la somme des sables et des limons grossiers atteint 67,5 % (tableau 1). Ce sont aussi les deux horizons inférieurs de ce même profil V3 qui présentent les teneurs en eau les plus faibles au point A. À ce point A, l'eau retenue par le sol atteint une valeur maximale de 8,69 % dans l'horizon 2 du profil V2 sur un total d'eau résiduelle (WB) de 16,36 %. L'eau définie par l'intervalle

Figure 5 - Réserve utile totale en eau (en mm) calculée sur 100 cm de profondeur pour chaque vertisol.

Figure 5 - Total useful water reserve (mm) calculated on 100 cm of depth for each vertisol.

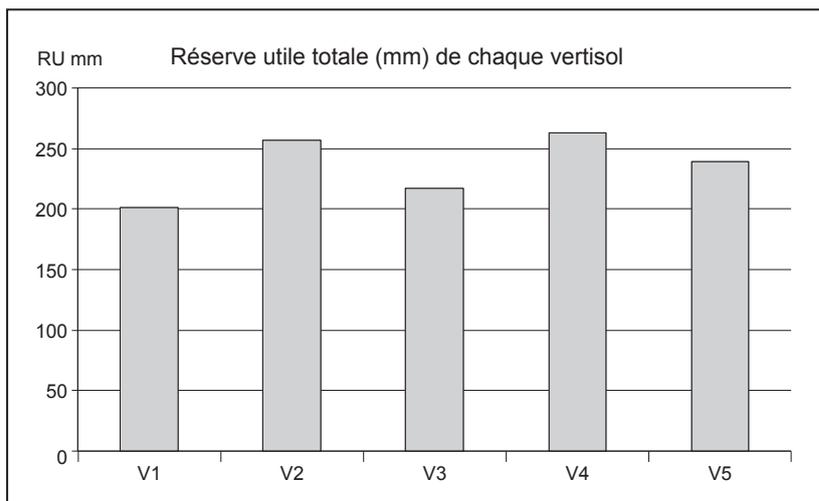
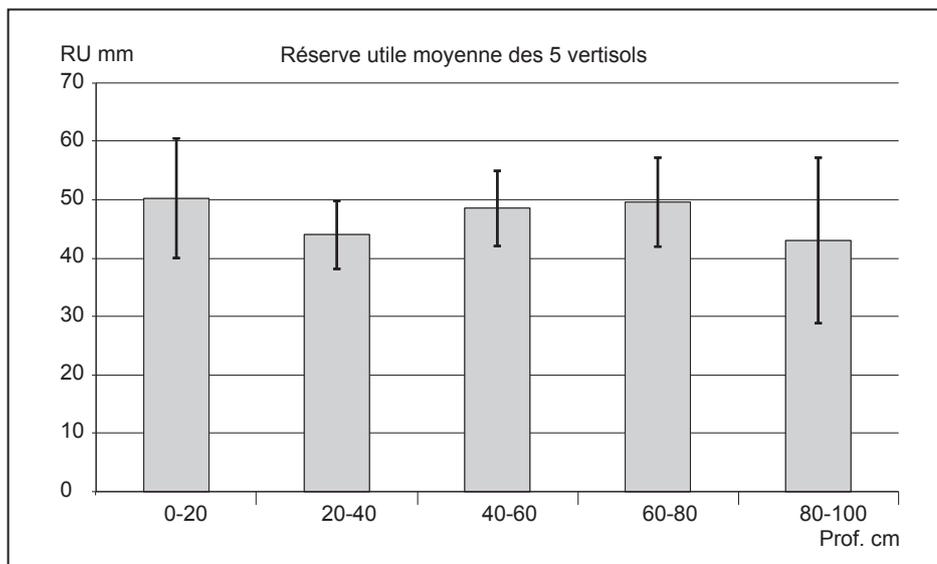


Figure 6 - Réserves utiles moyennes en eau exprimées en mm, classées par tranches de sol de 20 cm.

Figure 6 - Average useful water reserves (mm), classified by soil thicknesses of 20 cm.



WF-WC, présente une variabilité relativement plus élevée pour les horizons 1 et 4 du profil V1 avec 28,99 % et 40,04 % respectivement (*tableau 2*); elle serait partiellement retenue dans des pores, de relativement petite taille, impliquant un drainage lent, probablement plus abondant dans ces deux horizons. L'eau de la matrice argileuse (Wbs) retenue entre les particules élémentaires et par les cations échangeables est souvent supérieure à 20 % mais toujours inférieure à 30 %; les plus fortes valeurs atteignent 28,5 % dans les horizons V4 (0-20 cm) et V2 (60-80 et 80-100 cm).

Réserves hydriques

Toutes choses étant égales par ailleurs, notamment au regard de la préparation des échantillons, on peut évaluer, sur des échantillons massifs reconstitués, les réserves hydriques potentielles. Comme l'ont montré de nombreux travaux,

ce mode de préparation des échantillons a certainement plus de sens que l'estimation sur terre fine habituelle (Tessier et Pedro, 1976; Tessier, 1978a, b; Bruand et Prost, 1987; Bruand *et al.*, 1988; Tessier *et al.*, 1992; Bruand et Zimmer, 1992).

Exprimées en hauteur d'eau en mm, les réserves utiles (RU), déduites à partir de l'écart entre les teneurs en eau aux points D et B de la courbe de retrait (Braudeau, 2001), sont supérieures à 200 mm pour tous les sols et elles dépassent même les 250 mm pour les sols V2 (Mograne) et V4 (Oued Rmel) (*figure 5*). Ces valeurs reflètent l'impact positif des textures fines sur la rétention en eau utile et sur l'aptitude culturale de ces sols qui constituent de bons réservoirs d'eau pour les cultures annuelles. L'eau utile n'est pas seulement l'eau inter-agrégats du sol mais aussi l'eau de la matrice argileuse déformable. Nous constatons que la reconstitution complète de la réserve en eau jusqu'à 1 mètre de profondeur permettrait de couvrir

environ la moitié des besoins hydriques annuels d'une culture de blé (Vernet *et al.*, 1968).

Les réserves utiles moyennes varient entre 40 et 50 mm par horizon, mais elles sont les moins importantes dans l'horizon 20-40 cm. Le maximum de 50 mm est noté pour les horizons 0-20 cm et 60-80 cm (*figure 6*). L'écart-type le plus élevé apparaît dans l'horizon le plus profond; la variabilité serait due à l'enrichissement en sables plus net en profondeur dans le sol V3 (Bir Mcharga).

CORRÉLATIONS ENTRE DONNÉES PHYSICO-CHIMIQUES ET PARAMÈTRES HYDRIQUES

Les fonctions de pédotransfert sont extrêmement utiles comme outils de prévision des propriétés des sols et pour construire des modèles de prévision à caractère opérationnel, notamment en relation avec le développement des végétaux. Nous avons voulu tester différentes corrélations qui peuvent être utiles dans ce contexte.

Corrélation entre teneur en eau au PFP (WB) et fraction argileuse

Selon Braudeau (2001), le point B de la courbe de retrait correspond à la teneur en eau au point de flétrissement permanent des plantes ($\sim -1,6$ MPa). Nous obtenons la relation $WB = 0,1669A + 3,3762$ où WB est la teneur en eau pondérale au point B et A est le pourcentage d'argile, dans tous les horizons. Cette corrélation avec le pourcentage d'argile au sens granulométrique est significative (seuil 0,001) avec un coefficient de corrélation $r = 0,661$ pour 21 degrés de liberté ($n-2$).

Cette relation assez étroite entre les deux paramètres s'explique par le fait que l'eau du sol au point de flétrissement est seulement contenue dans les pores d'une matrice argileuse déformable et est en outre adsorbée autour des cations compensateurs de la charge superficielle des constituants.

Ceci n'est pas le cas pour la teneur en eau au point D de la courbe de retrait, c'est-à-dire lorsque le sol est à sa teneur en eau maximale, à savoir à sa capacité de rétention (correspondant *in situ* à la capacité au champ). En effet, la relation entre la teneur en eau au même point D et la teneur en argile est non significative ($r = 0,261$), notamment du fait que l'eau à cet état d'humidité est, en plus des eaux précédentes, retenue au sein des agrégats du sol, dans des pores/espaces/vides beaucoup plus grands que dans la matrice argileuse. Ce raisonnement s'applique aussi aux réserves utiles qui dépendent directement de l'organisation sub-macroscopique du sol. Ainsi, la corrélation entre la réserve utile et la teneur en argile est non significative ($r = 0,233$).

Corrélation entre teneur en eau au point de flétrissement permanent (WB) et capacité d'échange cationique

Nous obtenons la relation $WB \% = 0,2378CEC + 3,358$ où WB est la teneur en eau au point B de la courbe de retrait et CEC est la capacité d'échange cationique en $cmol.kg^{-1}$. Cette relation est significative (seuil 0,01) avec un coefficient de corrélation $r = 0,617$ à 22 degrés de liberté. Elle exprime le lien étroit qu'ont les deux variables avec l'argile gonflante de type smectite, en particulier son organisation. En effet, cette argile, abondante dans les vertisols étudiés (Ben Hassine *et al.*, 2012), se caractérise par sa forte capacité d'échange cationique et par sa matrice argileuse déformable.

Corrélation entre teneur en eau au point A (WA) et capacité d'échange cationique (CEC)

Au point A de la courbe de retrait, nous obtenons la relation: $WA = 0,185CEC - 1,3119$. Cette relation est significative (seuil 0,001) avec un coefficient de corrélation $r = 0,701$ à 22 degrés de liberté. Elle explique aussi que la partie de l'eau résiduelle au point A en équilibre avec l'humidité relative ambiante est retenue essentiellement par les cations échangeables, essentiellement l'ion calcium.

Corrélation entre capacité d'échange cationique (CEC) et réserve utile (RU)

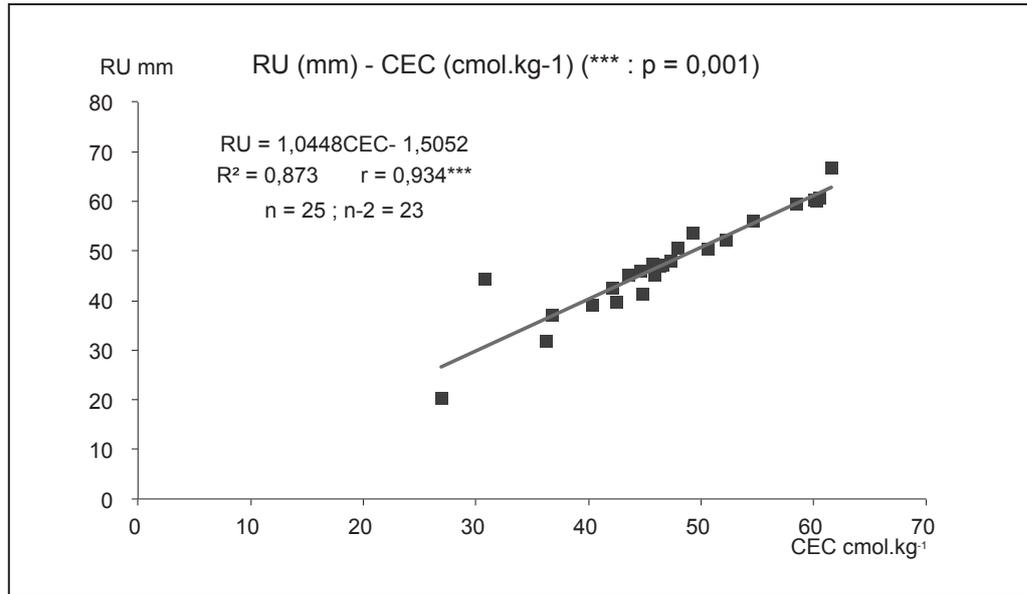
Cette relation intègre en fait les différentes contributions de l'organisation du sol avec ses constituants depuis le début de la courbe de retrait au point D jusqu'au point B, au point de flétrissement. Nous obtenons la relation $RU = 1,0448CEC - 1,5052$ où RU est la réserve en eau utile ($WD - WB$) en mm et CEC est la capacité d'échange cationique en $cmol.kg^{-1}$. Cette corrélation a été aussi significative ($p = 0,001$) avec un coefficient de corrélation $r = 0,934$, à 23 degrés de liberté (*figure 7*).

L'intervalle d'eau entre les points D et C de la courbe de retrait, qui fait à la fois partie de la réserve utile, de l'eau structurale (intra-agrégats) et de l'eau retenue par la masse argileuse (eau plasmique Wbs), est aussi corrélé (0,001) à la CEC ($cmol.kg^{-1}$) avec un coefficient de corrélation $r = 0,727$ à 23 degrés de liberté; l'équation obtenue est la suivante: $(WD - WC) \% = 0,2083CEC - 1,0021$.

Dans le cas de ces vertisols, ces résultats sont particulièrement intéressants. Ils signifient que la CEC, intégratrice de la teneur et de la qualité des argiles et des matières organiques, est un bien meilleur estimateur des propriétés des sols gonflants que la teneur en argile seule. Ceci confirme de nombreux résultats de la littérature (Bigorre *et al.*, 2000; Bruand et Zimmer, 1992; Tessier *et al.*, 1999). En outre, comme la CEC dépend fortement de la teneur en argiles expansibles de type

Figure 7 - Régression linéaire entre la capacité d'échange cationique (CEC) et la réserve utile en eau (RU).

Figure 7 - Linear regression between the cationic exchange capacity (CEC) and the useful water reserve (RU).



smectite, la teneur en eau à la réserve utile apparaît, pour ces vertisols, majoritairement retenue entre et dans les particules élémentaires des argiles.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les vertisols étudiés, développés sur des alluvions, présentent à peu près les mêmes caractères morphologiques. Leur texture est fine et leur couleur est foncée (tirsifiés) et homogène sur toute leur épaisseur. Ils se localisent dans des plaines alluviales à pente très faible d'où leur qualification de TOPOVERTISOLS (AFES, 2008) correspondant aux sols à drainage externe nul ou réduit de la CPCS (1967). Les résultats analytiques ont confirmé l'abondance de la fraction argileuse pour les cinq types de sols; le profil V3 (Bir Mcharga) fait l'exception par sa plus forte richesse en sables qui proviennent d'un dépôt alluvial sous-jacent sableux et plus ancien. Ceci ne modifie le caractère vertique que vis-à-vis de la rétention en eau. En effet, les variations de volume observées (de l'ordre de 30 %) sont tout à fait compatibles avec la structure vertique observée sur le terrain. Elle se caractérise, en particulier, par la présence de faces de glissement générées lors du gonflement, dues à des variations très importantes du volume du sol par le jeu des alternances dessiccation-humectation en conditions arides. En outre, le pH est alcalin, les teneurs en calcaire sont élevées et la matière organique est à des taux relativement faibles, mais elle est profondément incorporée dans le sol.

Les courbes de retrait obtenues pour les horizons superficiels des sols étudiés ont permis d'identifier les points qui spécifient les catégories d'eau et les organisations de

l'espace poral de la phase solide, ce qui a conduit à mieux interpréter les teneurs en eau à la capacité de rétention, (*in situ* capacité au champ) et au point de flétrissement permanent et leur signification. Ceci a abouti à calculer des réserves utiles et évaluer les rôles des argiles dans la rétention des différentes catégories d'eau, et par-delà de caractériser l'organisation du sol. Dans ce type de sol, la fraction argileuse agit d'une manière hautement significative sur les eaux résiduelles en équilibre avec l'humidité relative ambiante. Ceci n'est pas étonnant dans la mesure où les argiles calciques retiennent des quantités d'eau qui sont en général fortement corrélées à leur CEC, et à l'eau retenue par les cations échangeables. La relation des argiles avec les réserves utiles n'a pas été significative du fait que cette eau appartient à des structures sub-macroscopiques inter et intra-agrégats (peds primaires). Cependant, les réserves utiles ont été significativement corrélées avec la capacité d'échange cationique ce qui met en évidence le double rôle des smectites, abondantes dans les vertisols, sur les valeurs de la CEC et sur les fortes teneurs en eau qu'elles retiennent entre les agrégats primaires d'une part et entre les feuillets et la microstructure des argiles d'autre part. Les autres argiles de type kaolinite et illite, identifiées précédemment dans ces types de sols (Ben Hassine *et al.*, 2012), se caractérisent, en effet, par leurs basses valeurs de CEC et par leur faible hydratabilité.

En conclusion, la caractérisation analytique des TOPOVERTISOLS de la zone semi-aride a confirmé la prépondérance de la fraction argileuse dans la terre fine, la forte abondance des carbonates et du calcaire actif ainsi que les faibles teneurs en matière organique dont la répartition suit un gradient faiblement descendant avec la profondeur. Du fait de sa faible teneur, la matière organique n'a pas montré de lien évident ni avec la

capacité d'échange cationique ni avec les teneurs en eau des sols. C'est la fraction argileuse qui a des effets directs sur la genèse des agrégats (peds) primaires et sur les aspects de gonflement et de retrait des matériaux de ces sols. Elle a un impact évident sur les eaux résiduelles mais ne renseigne pas directement sur la réserve en eau utile pour les plantes, qui dépend majoritairement de l'eau retenue dans les vides des espaces de séparation entre les agrégats.

Les TOPOVERTISOLS constituent des milieux dominés, au plan physico-chimique, par les argiles dont les fortes proportions leur donnent leurs principaux caractères de texture fine, de haut potentiel d'échange et de réservoirs d'eau importants pour les cultures annuelles qui y sont pratiquées. Le rôle de la matière organique, dont les stocks sont affectés négativement par les façons superficielles réalisées fréquemment sur ces sols, serait plus évident si ses teneurs étaient améliorées par des apports exogènes périodiques et suffisants. Les techniques de l'agriculture de conservation telles que le semis direct, qui préserveraient une partie de la matière organique du sol contre la minéralisation et l'érosion, sont à confirmer par les travaux de recherche puis à adopter afin d'améliorer la productivité et atteindre les meilleurs rendements.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement Monsieur Daniel Tessier pour son aide très constructive lors de la révision de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Association française pour l'étude du sol (AFES), 2008 - Référentiel pédologique (RPF). Editions Quæ, Versailles, 405 p.
- Belkhdja K., Bortoli L., Cointepas J.P., Dimanche P., Fournet A., Jacquinet J.P. et Mori A., 1973. Les sols de la Tunisie septentrionale. Bulletin « Sols de Tunisie », n° 5, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 185 p.
- Ben Hassine H., Karbout N., Kridane K., Sanaa M. et Jedidi N., 2012 - Caractérisation des fractions colloïdales minérales et organiques des horizons superficiels des sols d'une toposéquence en zone semi-aride de la Tunisie. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 19, 2, 2012, pp. 105-118.
- Ben Rhaïem H., Pons C.H. et Tessier D., 1987 - Factors affecting the microstructure of smectites. Role of cation and history of applied stresses. Special Issue Proc. Int. Clay Conf. Denver, Clays and Clay Minerals. The Clay Minerals Society, pp. 292-297.
- Bigorre F., 2000 - Influence de la pédogenèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques. Mécanismes d'évolution et éléments de prévision. Thèse de l'Université Henri Poincaré, INRA Versailles, Unité de Science du sol, pp. 82-87.
- 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. C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes, 330, 2000, pp. 245-250.
- Boulaine J., 1975 - Géographie des sols. Presses Universitaires de France, 199 p.

- Braudeau E., 1988 - Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sols structurés. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, série 2, 307(15), pp. 1731-1734.
- Braudeau E., 1995 - Caractérisation des propriétés hydrostructurales des sols. ES 283, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 30 p.
- Braudeau E., 2001 - Pédostucture et caractérisation pédohydrrique. Bulletin « Sols de Tunisie », numéro spécial, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, pp. 19-40.
- Braudeau E. et Bruand A., 1993 - Détermination de la courbe de retrait de la phase argileuse à partir de la courbe de retrait établie sur un échantillon de sol non remanié. Application à une séquence de sols de Côte-d'Ivoire. C.R. Acad. Sci. Paris, t 316, Série II, pp. 685-692.
- Bruand A. et Prost R., 1987 - Effect of water content on the fabric of a soil material: an experimental approach. *Journal of Soil Science*, 38, pp. 461-472.
- Bruand A., Tessier D. et Baize D., 1988 - Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux: importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. C.R. Acad. Sci., Paris 307, Série II, pp. 1937-1941.
- Bruand A. et Zimmer D., 1992 - Relation entre la capacité d'échange cationique et le volume poral dans les sols argileux: incidences sur la morphologie des assemblages élémentaires. C.R. Acad. Sci., Paris 315, Série II, pp. 223-229.
- CPCS, 1967 - Classification des sols, édition 1967, INRA, 96 p.
- Duchaufour Ph., 1977 - Pédologie. 1. Pédogenèse et classification. Masson, Paris, pp. 28-66.
- Mering J., 1946 - On the hydration of montmorillonite. *Trans. Faraday Soc.* 42B, pp. 205-219.
- Mtimet A., 1999 - Atlas des sols tunisiens. Direction des sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 165 p.
- Naanaa W. et Susini J., 1988 - Méthodes d'analyse physique et chimique des sols. ES 252, Direction des sols, Ministère de l'agriculture, Tunisie, 118 p.
- Sposito G. and Prost R., 1982 - The structure of water adsorbed on smectites. *Chemical Review*, 82, pp. 553-573
- Tessier D., 1978a - Technique d'étude de l'orientation des particules argileuses utilisables sur des échantillons secs ou humides. *Annales agronomiques* 29, (2), pp. 193-207.
- Tessier D., 1978b - Etude de l'organisation des argiles calciques. Evolution au cours de la dessiccation. *Annales agronomiques* 29, (4), pp. 319-355.
- Tessier D., 1984 - Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux: hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse, INRA (Département de Science du sol) - Université Paris VII, 363 p.
- Tessier D., Bigorre F. et Bruand A., 1999 - La capacité d'échange outil de prévision de propriétés physiques des sols. C.R. Acad. Agric. France, 2, pp. 37-46.
- Tessier D., Lajudie A. et Petit J.C., 1992 - Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties. *Applied Geochemistry*, Suppl. Issue n°1, pp. 151-161.
- Tessier D. et Pedro G., 1976 - Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux. Évolution des principales argiles Ca au cours du phénomène de retrait, *Sci. Sol* 2 (1976) pp. 85-99.
- Vernet A., Mousset P. et Saglio P., 1968 - Nutrition azotée et consommation en eau d'un blé irrigué sous le climat de Tunis. Note technique, laboratoire d'agronomie de l'INA de Tunis, 24 p.
- Zidi C. et Braudeau E., 1998 - Le rétractomètre: mode d'emploi et utilisation pour la caractérisation hydrostructurale des sols. ES 303, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 26 p.