

Réserve utile des sols du Nord-Ouest tunisien

Evolution sous culture

H. Ben Hassine⁽¹⁾, M. Ben Salem⁽²⁾, G. Bonin⁽³⁾, E. Braudeau⁽⁴⁾ et C. Zidi⁽¹⁾

(1) Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie

(2) Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie (INRAT)

(3) Université de Provence (L.B.E.M./I.M.E.P.), Aix-Marseille 1, France

(4) Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Montpellier, France

RÉSUMÉ

Quatre types de sols céréaliers du Nord-Ouest tunisien, caractérisés d'une manière descriptive et analytique, ont été suivis au cours de deux campagnes agricoles pour étudier l'évolution de l'humidité de leurs horizons superficiels. Comparée aux limites inférieure et supérieure de la réserve utile, cette humidité reflète très nettement l'effet du climat et de la nature du matériau pédologique. Les sols du milieu bioclimatique subhumide, évoluant sur un matériau d'origine marneuse, gardent l'humidité sur un plus grand nombre de mois dans l'année. Ceux du milieu semi-aride sont moins argileux et à réserves utiles plus faibles qui n'atteignent presque jamais l'état de saturation des pores capillaires représenté dans cette étude par le point de gonflement maximum des agrégats primaires (WD). Le lien entre l'humidité et le rendement des cultures est évident. Plus les teneurs en eau sont élevées et la période d'humectation du sol est longue, meilleur est le rendement.

Les teneurs en eau des sols ont été corrélées à la capacité d'échange de cations (CEC) et à la densité apparente. Les résultats ont montré un lien entre point de flétrissement permanent (WB) et CEC pour les Vertisols et les sols à caractère vertique d'une part et entre capacité au champ (WD) et densité apparente pour les sols les moins argileux du milieu semi-aride d'autre part.

Mots clés

Réserve hydrique, réserve utile, subhumide, semi-aride, retrait, rétractométrie, CEC, densité apparente.

SUMMARY

SOIL AVAILABLE WATER IN NORTH-WEST TUNISIA. Soil water time series

Four types of cereal soils of the tunisian North-West, characterized of a descriptive and analytic way, have been monitored during two cropping seasons for studying the moisture evolution of their superficial horizons. Compared to the lower and the upper limits of the useful reserve, this moisture reflects very distinctly the effect of the climate and the nature of pedologic material. The soils of the sub-wet bioclimatic

environment, evolving on a marly origin material, keep moisture on a greater number of months in the year. Those of the semi-arid environment are less clayey and their useful reserves are lower. These reserves reach hardly the saturation state of the capillary pores, represented in this survey by the maximum swelling point of the primary peds (WD). The effect of soils moisture on the crop yields is obvious. The more the water contents of soils are higher and the moist period of soils is longer, the more the yield is better.

Water contents of soils were related to the cations exchange capacity (CEC) and to the bulk density (d_b). Results showed firstly a link between the permanent withered state (WB) and CEC for vertisols and the vertic character soils and secondly between the field capacity (WD) and the apparent density (d_a) for the least clayey soils of the semi-arid environment.

Key-words

Water reserve, available water, sub-wet, semi-arid, shrinkage, retractometry, CEC, bulk density

RESUMEN

RESERVA APROVECHABLE DE SUELOS DEL NOROESTE TUNECINO. Evolución bajo cultivo.

Cuatro tipos de suelos para cereales del noroeste tunecino, caracterizados de una manera descriptiva y analítica, fueron seguidos en el curso de dos campañas agrícolas para estudiar la evolución de la humedad de los horizontes superficiales. Comparada a los límites inferior y superior de la reserva aprovechable, esta humedad refleja muy netamente el efecto del clima y de la naturaleza del material pedológico. Los suelos del medio bioclimático subhúmedo, que se desarrollan sobre un material margoso, guardan la humedad en un más grande número de meses del año. Los del medio semi-árido son menos arcillosos y con reservas aprovechables más pequeñas que casi nunca llegan al estado de saturación de los poros capilares representado en este estudio por el punto de expansión máximo de los agregados primarios (WD). La relación entre la humedad y el rendimiento es evidente. Más los contenidos en agua son elevados y el periodo de humectación del suelo es largo, mejor es el rendimiento. Los contenidos en agua de los suelos fueron ligados a la capacidad de intercambios de cationes (CIC) y a la densidad aparente. Los resultados muestran una relación entre el punto de marchitez permanente (WB) y CIC para los vertisoles y los suelos con características vérticas de un lado y entre capacidad de campo (WD) y densidad aparente para los suelos menos arcillosos del medio semi-árido de otra parte.

Palabras claves

Reserva en agua, reserva aprovechable, subhúmedo, semi-árido, refractometría, CIC, densidad aparente.

Dans les pays arides et semi-arides de la rive sud du bassin méditerranéen, le climat se caractérise par sa longue saison sèche et par l'irrégularité de la pluviométrie. Les cultures conduites sous régime pluvial sont souvent soumises à des déficits hydriques, de durée variable, causés par l'épuisement des réserves d'eau stockées dans le sol. Ce déficit hydrique, qu'il soit prolongé ou de courte durée, affecte inéluctablement, d'une manière négative, les rendements des cultures. Les sols cultivés peuvent réunir tous les facteurs et propriétés favorisant l'obtention des meilleurs rendements, mais leurs potentialités ne s'expriment réellement qu'avec des réserves hydriques suffisantes pouvant subvenir aux besoins en eau des cultures durant la totalité de leur cycle végétatif. Les bonnes récoltes, dans ces régions sont donc tributaires des années pluviométriques et la relation devient de plus en plus évidente au fur et à mesure que le climat s'assèche. L'eau est ainsi le facteur limitant des productions dans ces régions car elle est le vecteur des éléments nécessaires à la croissance de la plante. En l'absence de pluviométrie suffisante pour satisfaire les besoins des cultures, tout effort d'amélioration de la productivité par les apports d'engrais est inutile. Les techniques culturales et la préparation adaptée des sols jouent au contraire un rôle favorable au stockage et à la conservation de l'eau dans la porosité capillaire du sol (Damagnez, 1958; Ben Khélil, 1989; Slama, 1989). Ceci implique de gérer les époques d'intervention par les labours et les autres façons superficielles. Les objectifs recherchés sont, entre autres, la lutte contre les mauvaises herbes et la création de conditions favorables à l'infiltration des eaux pluviales pour leur conservation à l'abri de l'évaporation.

Le Nord-Ouest de la Tunisie constitue la région la plus arrosée du pays. Il est exposé aux courants humides traversant la méditerranée occidentale et ce sont les reliefs et la côte qui reçoivent le maximum de pluviométrie durant les saisons pluvieuses. Les plaines alluviales, les vallées inter-montagneuses, les zones collinaires reçoivent moins de précipitations, mais une zonalité climatique caractérise cette partie septentrionale du pays, de sorte que les classes bioclimatiques se succèdent, avec des intervalles et des espaces très étroits, à partir de l'humide jusqu'au semi-aride inférieur (Bortoli *et al.*, 1969). C'est aussi la région adaptée aux cultures céréalières dont le cycle de croissance coïncide avec le rafraîchissement du climat et l'augmentation de la pluviométrie.

Le présent travail consiste à présenter, d'abord les caractères et les propriétés des sols les plus aptes à la céréaliculture, puis exposer les résultats d'un suivi mensuel des teneurs en eau pour des cultures de type annuel, à enracinement superficiel. Ces résultats sont confrontés aux rendements des cultures pour tirer des conclusions concernant l'impact de l'évolution des réserves utiles des sols sur la production des espèces céréalières.

CADRE GÉOGRAPHIQUE ET TYPES DE SOLS ÉTUDIÉS

Quatre types de sols sont choisis, en fonction des types de matériaux les plus répandus dans cette région naturelle, après consultation des études et des cartes pédologiques disponibles (Belkhdja *et al.*, 1973; Khafallah, 1989). Ils peuvent être considérés comme représentatifs des meilleures unités aptes à la céréaliculture, c'est-à-dire : profondeur importante, texture fine, topographie plus ou moins plane, fortes capacités de rétention en eau, etc... La méthodologie de travail adoptée exclut les unités de sols présentant une ou plusieurs déficiences pouvant influencer directement sur le niveau de productivité. Deux de ces types de sols se trouvent sous bioclimat subhumide (région de Béja) et les deux autres sont sous bioclimat semi-aride, à la limite entre ses sous-étages supérieur et moyen (région du Kef). Des échantillons ont été prélevés des profils de ces sols, sur les lesquels des analyses de caractérisation initiale ont été effectuées au laboratoire. Ces sols ont été, par la suite, échantillonnés à la tarière (tous les 20 cm), d'une manière mensuelle, durant deux campagnes agricoles (1996-1997 et 1997-1998), pour la mesure de l'humidité. Les résultats de ce suivi mensuel sont commentés par rapport aux valeurs de la réserve utile déterminées par méthode rétractométrique. Une telle démarche est adaptée pour suivre l'évolution des teneurs en eau dans le sol et étudier leur comportement dans l'objectif de localiser dans le temps, les périodes les plus favorables à l'alimentation en eau des cultures et celles les plus défavorables.

Les quatre types de sols sont situés dans les plaines alluviales ou les zones collinaires à sommets très arrondis. Les matériaux originaux sont issus de roches montagneuses de nature calcaire et marneuse, et de l'altération de marnes et d'argiles du Crétacé et de l'Eocène. Ils sont classés suivant leur dépendance pédogénétique qui se réfère au système de classification française établi par la CPCS (1967). Les zones où sont implantés les profils représentatifs des quatre types de sols sont couvertes par les études pédologiques réalisées par Loyer (1970), Mori (1968) et Souissi (1966).

Les sols du milieu subhumide

Les sols peu évolués (vertic Xerochrepts)

Le site de prélèvement est situé près du lit de l'oued El Hammam à quelques kilomètres à l'est de la ville de Béja. Le profil est profond et le matériau meuble dépasse 1,5 m de profondeur. Il est carbonaté sur toute son épaisseur et sa texture est fine. En période sèche, les fentes de retrait s'ouvrent à la surface et s'enfoncent profondément dans le sol. A l'état humide, ils sont plastiques et boueux. Le labour pratiqué à cet état compacte le sol qui devient peu poreux et très peu fragile après son assèchement. La dénomination complète de ce type de sol dans la classification française (CPCS, 1967) est la suivante : sol peu évolué, d'origine non climatique, d'apport alluvial, à caractère vertique, sur alluvions.

Les Vertisols (typic Chromoxererts)

Ces sols sont à deux kilomètres environ à l'ouest des précédents et se localisent sur le versant très doux d'une forme collinaire à assise marneuse. Ils sont profonds, de couleur foncée homogène sur tout le profil ; les horizons se distinguent par leur structure qui devient plus grossière et plus développée dans l'horizon moyen (B). Les faces luisantes et de glissement apparaissent plus nettement dans le fond du profil. En période sèche, de larges fentes de retrait s'ouvrent à la surface du sol et pénètrent profondément dans le matériau.

Dans la classification CPCS (1967), ils peuvent être identifiés de la façon suivante : Vertisols, à drainage externe possible, non grumosoliques (à structure anguleuse), modaux, sur matériau d'altération et de remaniement de marnes (Tortonien : Miocène inférieur).

Les sols du milieu semi-aride

Les sols peu évolués (typic Xerofluvents)

Ils se développent sur des alluvions de l'oued Ech-Cheria et des colluvions des reliefs environnants, dans une plaine inter-montagneuse à l'est de la ville du Kef (15 km environ). Leur texture est moins lourde que les précédents, et même certains horizons à la base du profil sont plus pourvus en sables. Leur tendance d'évolution pédogénétique est la steppisation, comme le signalent les indices d'une ébauche de mobilisation des carbonates.

Leur classification selon le système de la CPCS (1967) est la suivante : sols peu évolués d'origine non climatique, d'apport alluvial et colluvial, modaux, sur alluvions de texture fine.

Les sols bruns isohumiques (typic Calcixerolls)

Leur position topographique assez constante, dans une large plaine continentale située à 15 km au sud-ouest de la ville du Kef, au milieu de reliefs collinaires assez éloignés les uns des autres, est à l'origine d'une stabilité pédogénétique qui a abouti à un ultime stade d'évolution concrétisé par la migration presque totale des carbonates et l'individualisation d'un profil de type brun isohumique, selon la classification d'Aubert (Chettaoui, 1975). La texture de ces sols est équilibrée à limono-argileuse ; l'horizon superficiel est de couleur foncée et sa structure est arrondie, peu grossière. Il peut être assimilé à un épipédon mollique de la « soil taxonomy ». Le calcaire s'accumule dans les horizons inférieurs où il se concentre en amas et en nodules.

Ils peuvent être classés dans le système de la CPCS (1967) comme sols isohumiques à complexe saturé évoluant sous pédoclimat à hiver frais pendant les saisons pluvieuses, bruns (marrons) modaux, sur alluvions.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les mesures mensuelles d'humidité

Les prélèvements sont effectués à la tarière tous les 20 cm, une fois par mois. Les échantillons sont conservés dans des sacs en plastique étanches pendant leur transport au laboratoire où ils sont pesés puis placés à l'étuve pour séchage à 105 °C, pendant 24 heures. Le résultat est exprimé en % et représente l'humidité pondérale (Hs) calculée par rapport au poids du sol sec. La durée de prélèvement s'est étalée sur deux campagnes agricoles : de décembre 1996 jusqu'à juin 1998.

Les densités apparentes

Elles sont déterminées directement sur le terrain en employant des cylindres métalliques de 100 cm³ de volume qui sont enfoncés horizontalement dans les différentes couches des quatre profils pédologiques. Les parois verticales des sols ont été préalablement humectées pour faciliter la pénétration des outils de mesure. L'opération est répétée deux fois et le résultat est la moyenne des deux mesures. La valeur de la densité apparente est calculée après passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures.

Les pluviométries mensuelles

Elles sont mesurées quotidiennement au pluviomètre dans les unités coopératives de production (UCP) gérant les sols étudiés ou ceux des parcelles voisines (Ben Hassine *et al.*, 2001). La pluviométrie mensuelle représente le cumul des mesures quotidiennes relevées au cours du mois. Les hauteurs mensuelles (*courbe noire, figures 3, 4, 5 et 6*) relatives à chaque station signalent la coïncidence des pluies les plus importantes avec la saison hivernale et à un degré moindre avec les saisons automnale et printanière, pour toutes les stations.

Les cultures introduites sur les quatre types de sols

En milieu subhumide, l'assolement biennal comprend une céréale (blé dur ou tendre) suivie par la betterave à sucre ou par un fourrage associant une graminée (avoine ou orge) à une légumineuse (vesce). Les cultures qui ont occupé les sols au cours des deux campagnes d'observation sont :

- Un blé dur (var. Karim) suivi d'une betterave à sucre sur le vertisol.
- Un fourrage de vesce-orge suivi d'un blé dur (var. Khir) sur le sol peu évolué.

En milieu semi-aride, les propriétaires pratiquent la monoculture de céréales avec ou sans jachère : le blé tendre suivi de l'orge sur le sol isohumique et la jachère suivie d'une culture d'orge sur le sol peu évolué.

Les analyses

Les analyses de laboratoire

Les échantillons de sols ont été séchés à l'air, broyés et tamisés (<2 mm) :

- La composition granulométrique des échantillons a été déterminée par la méthode à la pipette de Robinson.

- La conductivité électrique a été mesurée au conductivimètre et exprimée en mS/cm.

- Le calcaire total (%) a été obtenu par la méthode au calcimètre Bernard après dissolution des carbonates par l'acide chlorhydrique dilué et mesure du volume de CO_2 dégagé.

- La capacité d'échange de cations (CEC) a été déterminée par la méthode à la percolation à l'acétate d'ammonium 1N, à pH = 8,2. L'échantillon saturé en ions NH_4^+ est lavé à l'alcool puis désaturé par une solution de NaCl. L'ion NH_4^+ dissous et entraîné est dosé par colorimétrie (Naânaâ et Susini, 1988). Le résultat est exprimé en méq/100 g.

Les analyses au rétractomètre

Nous avons utilisé l'appareil décrit par Braudeau, (1988, 1995). Il mesure le retrait des échantillons de sols préalablement humidifiés par capillarité dans un bac de sable. On étudie le départ d'eau à 28-30 °C pendant 72 heures au maximum lorsque l'échantillon est argileux.

L'appareil permet de suivre en continu la variation de volume et de poids de laquelle on déduit la variation de la teneur en eau (Zidi et Braudeau, 1998). Les deux paramètres qui nous intéressent dans cette étude sont les teneurs en eau à l'état de saturation des pores capillaires correspondant à la capacité au champ et celui relatif au point de flétrissement permanent des plantes. Ces deux paramètres sont symbolisés par WD et WB (*figure 1*).

WE est un troisième paramètre correspondant à une teneur en eau supérieure à WD, qui est interprétée comme liée à l'ouverture des fentes de retrait. Lorsque cette valeur est inférieure à celle de WD, elle la remplace comme état équivalent à la capacité de rétention en eau maximale de la matrice du sol ou capacité au champ (*figure 2*). Cette situation a été observée, dans l'actuelle expérimentation, dans trois cas seulement : deux pour le vertisol (Béja) et un pour le sol peu évolué (Béja).

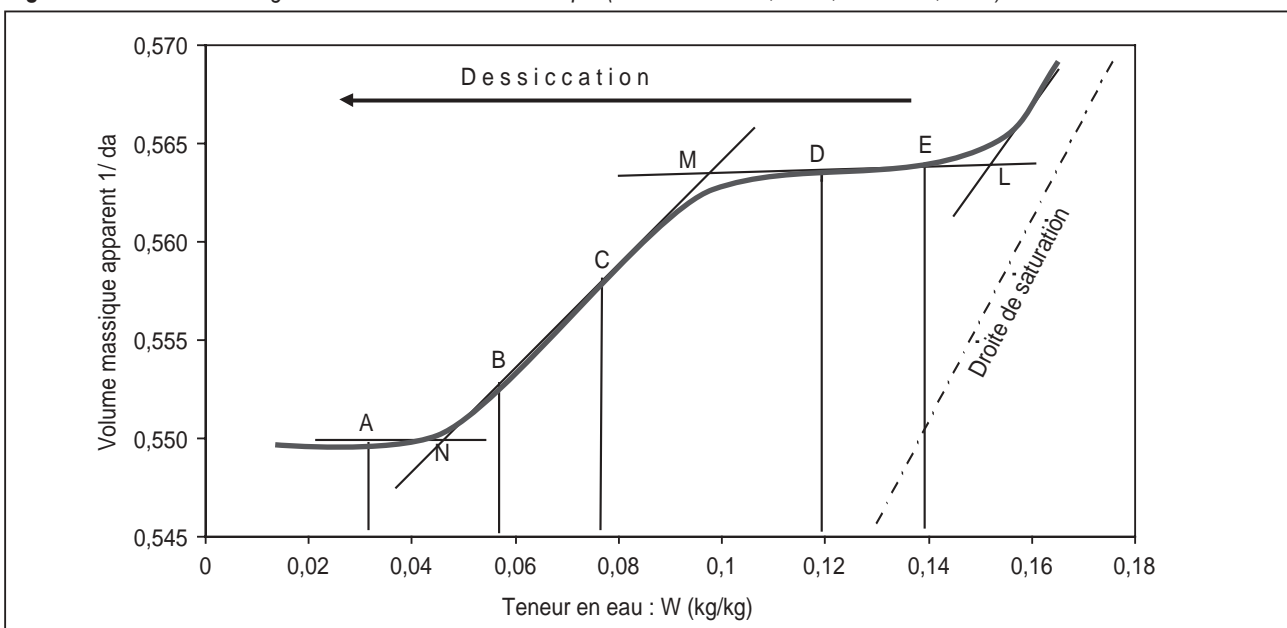
RÉSULTATS

Les résultats analytiques

Les résultats d'analyses de laboratoire qui ont concerné les paramètres granulométrie, CEC, CE et CaCO_3 total sont portés sur les *tableaux 1 et 2*.

Figure 1 - Courbe de retrait standard d'un échantillon de sol remanié (Zidi et Braudeau, 1998 ; Braudeau, 2001)

Figure 1 - Standard shrinkage curve of a disturbed soil sample (Zidi et Braudeau, 1998 ; Braudeau, 2001)



Les points A, B, C, D, E, F sont les points de transition des phases de retrait et L, M, N, les points de rencontre des droites prolongeant les phases linéaires (Braudeau, 2001).

Tableau 1 - Compositions granulométriques (%) des quatre profils de sols étudiés**Table 1** - Particule-size distribution (%) for the four soils studied

Profondeurs en cm	Bioclimat subhumide (Béja)										Bioclimat semi-aride (Le Kef)									
	Vertisol					Sol peu évolué					Sol isohumique					Sol peu évolué				
	A	LF	LG	SF	SG	A	LF	LG	SF	SG	A	LF	LG	SF	SG	A	LF	LG	SF	SG
0-20	46	24	14	10	4	47	30	9	11	3	38	20	3	30	8	38	24	7	20	10
20-40	55	15	17	8	2	58	25	5	8	4	34	19	6	30	10	48	19	6	19	7
40-60	55	15	17	8	2	58	25	5	8	4	35	16	7	25	5	48	19	6	19	7
60-80	68	18	5	8	2	72	17	3	7	1	46	16	7	25	5	38	16	5	35	5
80-100	68	18	5	8	2	48	21	13	12	5	48	14	5	25	7	38	16	5	35	5
100-120	75	12	5	5	2	48	21	13	12	5	48	14	5	25	7	21	13	6	38	22

Tableau 2 - Résultats d'analyses de la CEC (méq/100 g), CE (mS/cm) et CaCO₃ total (%) dans les quatre profils étudiés**Table 2** - CEC (méq/100 G), EC (mS/cm) and total CaCO₃ (%) analysis results for the four studied profiles

Profondeurs en cm	Bioclimat subhumide, Béja						Bioclimat semi-aride, Le Kef					
	Vertisol			Sol peu évolué			Sol isohumique			Sol peu évolué		
	CEC	CE	CaCO ₃ total	CEC	CE	CaCO ₃ total	CEC	CE	CaCO ₃ total	CEC	CE	CaCO ₃ total
0-20	37	1,9	23	34	0,7	28	22	1,6	3	27	1,0	25
20-40	39	0,9	20	35	0,5	25	22	4,6	3	27	0,5	27
40-60	39	0,9	20	35	0,5	25	28	0,6	4	27	0,5	27
60-80	38	2,1	20	31	0,7	24	22	1,1	14	15	0,7	38
80-100	38	2,1	20	28	0,7	27	16	3,8	20	15	0,7	38
100-120	39	2,3	20	28	0,7	27	16	3,8	20	13	0,5	34

CEC : Capacité d'échange cationique en méq/100g.

CE : Conductivité électrique de l'extrait de saturation de la pâte en mS/cm.

CaCO₃ total : Calcaire total en %.

EC : Cationic exchange capacity in meq/100g.

EC : Electric conductivity of the the saturated soil paste extract, in mS/cm.

Total CaCO₃: Total limestone in %.

Ces quatre types de sols se caractérisent par leur richesse relative en particules fines et notamment pour les sols du bioclimat subhumide (tableau 1). Les teneurs en argiles frôlent et dépassent même la valeur de 70 % dans certains horizons des deux types de sols. Sous climat semi-aride, les teneurs en sable fin sont voisines de 45 %. Dans la distribution des fractions fines en fonction de la profondeur, le vertisol et le sol isohumique montrent une certaine régularité dans la croissance du pourcentage d'argile. Les sols peu évolués sont hétérogènes et indiquent le caractère stratifié des couches d'âge relativement récent.

Pour les vertisols, la CEC varie dans un intervalle très étroit: 37 à 39 méq/100 g, ce qui confirme l'homogénéité verticale du sol avec des proportions et des natures des constituants semblables entre les horizons. Pour les sols peu évolués, la CEC est légèrement plus faible dans les horizons supérieurs du profil; elle chute ensuite, à partir de 80 cm, jusqu'à 28 méq/100 g.

En zone subhumide, la CEC est élevée et ses valeurs confirment la richesse plus importante des sols en particules granulométriques fines.

Seuls les vertisols et les sols isohumiques présentent des valeurs de la CE, voisines de 2 mS/cm en profondeur. Pour le premier cas, c'est le gypse présent dans le matériau originel (marnes aquitaines) qui est responsable du léger accroissement de la CE. Pour le second cas, c'est une salinité résiduelle due à une ancienne irrigation effectuée à partir de la nappe phréatique qui est légèrement salée: environ 2 g/l de résidu sec (Zebidi, 1971).

Les quatre profils sont carbonatés dans la totalité de leurs horizons excepté pour le sol isohumique dont les 60 cm supérieurs sont partiellement décarbonatés. Pour ce dernier, les carbonates ont été entraînés en profondeur par le processus d'évolution pédogénétique de type isohumique qui règne dans la région.

Les capacités de stockage de l'eau des quatre types de sols

Elle repose sur l'étude du retrait des échantillons (figure 2):

Pour le vertisol (Béja):

- Les teneurs en eau au point de flétrissement permanent (WB) sont comprises entre 12 et 15 % pour la totalité des six horizons (0 à 120 cm).

- Les teneurs en eau au point WD correspondant à la capacité au champ sont proches de 40 % en humidité pondérale (Hs %). Les horizons à plus haute capacité de rétention en eau sont ceux de surface (0-20 cm) et de profondeur (100 – 120 cm).

- Pour l'humidité au point WE, ses valeurs sont généralement supérieures à celles de WD, sauf dans la tranche de sol comprise entre 0 et 40 cm, ce qui pourrait signifier qu'un départ de l'eau capillaire est déclenché avant celle résultant du retrait des agrégats et dénote aussi la présence de deux structures différentes entre les horizons de surface et ceux de profondeur.

- La réserve utile moyenne du profil de vertisol (WD-WB) est comprise entre 22,6 et 33,4 %, ce qui peut être considéré comme une teneur élevée (tableau 3).

Pour le sol peu évolué (Béja):

- Le même raisonnement relatif au vertisol montre que la teneur en eau à WB varie entre 10 et 14 %. La valeur la plus élevée est celle de l'horizon inférieur.

- Pour WD, l'humidité varie de 33 à 37 % et les valeurs les plus élevées sont celles de 0-20, 40-60 et 80-100 cm.

- Pour le point WE, les valeurs sont presque toujours supérieures à celles du point WD, sauf pour l'horizon 20-40 cm.

- La réserve utile de ce sol est comprise entre 22,5 et 25,9 % (tableau 3). Le calcul montre que 65 mm d'eau sont nécessaires pour reconstituer la réserve utile dans l'horizon superficiel.

Pour le sol isohumique (Le Kef):

- WB varie de 11 à 14 % et augmente en profondeur (60-100 cm).

- Au point WD, l'humidité oscille entre 32 et 35 % et augmente aussi en profondeur.

- Au point WE, les teneurs en eau sont toujours supérieures à celles du point WD et reflètent authentiquement le départ plus rapide de l'eau retenue entre les agrégats.

La réserve utile dans ce profil varie entre 20,2 et 24,5 % (tableau 3). Ces valeurs sont plus faibles que celles observées dans les deux profils du milieu subhumide.

Pour le sol peu évolué (Le Kef):

- A WB, les teneurs en eau sont inférieures ou égales à 10 % sauf pour l'horizon 80 - 100 cm où Hs atteint 12 % environ.

- Les humidités au point WD sont plus élevées en surface où elles sont voisines de 30 % et diminuent progressivement avec la profondeur pour atteindre 26 % environ.

- Au point WE, les teneurs en eau dépassent toujours celles du point WD. La diminution avec la profondeur est progressive pour ce type d'eau.

La réserve utile dans ce profil est importante dans l'horizon superficiel, avec 23 % environ (tableau 3). Elle chute dans les horizons suivants où elle n'est que de 19 % entre 20 et 40 cm. Sa valeur la plus basse apparaît dans les horizons les plus profonds (80 - 120 cm) avec 12 % seulement.

En résumé, à la capacité au champ (WD dans cette étude), les réserves utiles les plus élevées sont celles des sols du bioclimat subhumide (tableau 3), ce qui est en relation avec la teneur en argile de leurs matériaux originels issus directement de l'altération des marnes (Ben Hassine, 2002).

Les teneurs en eau au point de flétrissement permanent sont plus faibles que les mesures habituellement trouvées par la méthode à la pression (20 % environ en humidité pondérale pour un sol argi-

Tableau 3 - Densités apparentes (da) et réserves utiles (RU en % et en mm) des horizons des quatre profils pédologiques étudiés

Table 3 - Bulk densities (da) and available water (RU in % and mm) of the horizons four the four studied pedological profiles

Profondeurs en cm	Vertisol (Béja)			Sol peu évolué (Béja)			Sol isohumique (Le Kef)			Sol peu évolué (Le Kef)		
	da	RU (%)	RU (mm)	da	RU (%)	RU (mm)	da	RU (%)	RU (mm)	da	RU (%)	RU (mm)
0-20	1,131	28,05	63,4	1,250	25,86	64,7	1,263	20,87	66,6	1,298	22,99	59,7
20-40	1,225	22,63	55,4	1,442	20,89	60,2	1,310	20,20	52,9	1,345	19,47	52,4
40-60	1,225	31,47	77,1	1,442	23,70	68,4	1,390	21,77	60,5	1,345	18,94	50,9
60-80	1,373	25,41	69,8	1,447	23,05	66,7	1,313	19,74	51,8	1,508	15,16	45,7
80-100	1,373	26,63	73,1	1,451	25,29	73,4	1,468	22,88	67,2	1,508	12,51	37,7
100-120	1,343	33,39	89,7	1,451	22,55	65,4	1,468	24,51	72	1,634	12,17	39,8
Total 0-60 cm			159,9			193,3			180			163
Total 0-120 cm			428,5			398,8			371			286,2

Tableau 4 - Coefficients de détermination R^2 (les plus élevés) et équations des relations WB-CEC, WD-da et WE-da pour les quatre types de sols étudiés

Table 4 - Determination coefficients R^2 and Wb-CEC, WD-da and WE-da relationships for the four types of the studied soils

Type de sol	WB - CEC		WD - da		WE - da	
	Equations	R^2	Equations	R^2	Equations	R^2
Vertisol (Béja)	$WB = -2,187 (CEC)^2 + 166,7 CEC - 3159,5$	0,933	-	0,262	-	0,157
SPE* (Béja)	$WB = 0,204 (CEC)^2 + 13 CEC + 216,75$	0,832	-	0,264	$WE = 3219,1 (da)^2 - 8674,9 da + 5850,2$	0,757
Sol isohumique	-	0,282	$WD = 186,62 (da)^2 - 499,37 da + 366,14$	0,921	$WE = -541,87 (da)^2 + 1497,6 da - 993,15$	0,795
SPE* (Le Kef)	-	0,309	$WD = 45,89 (da)^{-1,578}$	0,955	$WE = 182,98 (da)^2 - 564,05 da + 460,03$	0,872

* Sol peu évolué

lo-limoneux), bien que les échantillons utilisés dans les deux cas soient perturbés (broyés et tamisés à 2 mm). Les valeurs de WB seraient ainsi différentes de celles mesurées par la méthode à la pression qui devraient être légèrement supérieures aux chiffres trouvés.

Résultats de tests de corrélation : WB-CEC, WD-da, WE-da

Afin de pouvoir discuter de l'effet des caractéristiques du sol sur la rétention de l'eau, une analyse statistique a été effectuée dans le but de déterminer l'importance de la capacité d'échange de cations (CEC) et de la densité apparente (da) sur les propriétés hydriques des sols. Les résultats obtenus montrent que (tableau 4) :

- Entre l'humidité au point WB et CEC, les coefficients de détermination R^2 sont élevés pour les deux types de sols du milieu sub-humide. Un tel résultat confirme les constatations de Bigorre *et al.* (2000) qui ont montré qu'au point de flétrissement permanent (-1,6 MPa), la CEC intègre l'eau retenue et les particules argileuses et les matières organiques. Les vertisols et les sols peu évolués du milieu subhumide sont, en effet, les plus pourvus en argiles (tableau 1).

- La corrélation entre l'humidité au point WD et la densité apparente (da) est significative pour le cas des sols de la région du Kef. Les coefficients de détermination R^2 sont trop faibles pour les sols du milieu subhumide. Ainsi pour les sols les plus argileux, la relation entre teneur en eau à la capacité au champ (WB) et densité apparente (da) n'est pas significative.

- La corrélation entre l'humidité au point WE et la densité apparente (da) est significative dans le cas des sols de la région du Kef et du sol peu évolué de la région de Béja. Pour le vertisol dont la texture est la plus lourde, R^2 est non significatif avec une valeur de 0,157. Ce résultat peut être considéré comme analogue sinon proche de celui de la corrélation WD-da.

En conclusion, les corrélations sont partiellement significatives pour chaque test : la relation WB-CEC est confirmée pour les sols les plus argileux et présentant des caractères vertiques donc une

richesse particulière en argiles gonflantes ; les relations WD-da et WE-da sont plus évidentes dans le cas des sols moins argileux de la région du Kef.

Evolution des réserves utiles mensuelles

Les résultats précédents ont été utilisés pour juger de l'évolution de la réserve hydrique des 60 centimètres supérieurs des sols qui abritent 70 % au moins des racines des céréales au stade épiaison (Slama *et al.*, 2000).

- Pour le vertisol, la recharge en eau maximale se produit en février pour la campagne 1996-1997 et en décembre pour celle de 1997-1998 (figure 3). La courbe d'humidité est parallèle à celle de la pluviométrie : des augmentations hivernales suivies d'une chute progressive jusqu'en juin. Les trois mois d'été sont très secs de sorte que l'humidité du sol est très proche ou inférieure même à celle de WB. L'horizon qui subit le plus l'assèchement est celui de 0-20 cm. Le stress hydrique des plantes devrait se manifester dès la période d'avril-mai puisque les teneurs en eau se situent dans le dernier tiers de la réserve utile.

- Pour le sol peu évolué du milieu subhumide, les réserves hydriques sont maximales en février 1997 et en décembre 1998 (figure 4). La courbe de la pluviométrie n'est pas réellement parallèle à celle des réserves en eau du sol ; on constate en effet que la recharge du sol se produit avec un mois de retard par rapport à la pluviométrie. En outre, l'assèchement estival du sol est plus rapide pour la deuxième campagne puisque la culture pratiquée est un blé qui a occupé le sol jusqu'au début de l'été. La culture conduite au cours de la première campagne est un fourrage qui est coupé au mois d'avril ; l'eau n'est, par conséquent, plus consommée à partir de cette date.

- Pour le sol isohumique, les réserves utiles sont restées presque nulles au cours de la première campagne (figure 5). La situation a été meilleure au cours de la deuxième campagne avec la recharge en eau suite aux pluies du mois d'octobre 1997. En conséquence, l'eau dans ce profil a été rare notamment au cours de la campagne

1996-1997. Les horizons de surface ne permettent aucune alimentation en eau pour les plantes cultivées à partir de mai et jusqu'en octobre 1997. Dans les horizons inférieurs, les réserves stockées sont très faibles en dépit d'une courbe d'évolution de H (réserves hydriques) qui reste presque toujours au-dessus de celle de l'horizon 0-20 cm. L'effet du climat est visible sur ce sol qui accumule des réserves très faibles par rapport à ceux de la zone sub-humide.

- Dans le cas du sol peu évolué de la région du Kef, la situation s'améliore par rapport au site précédent malgré de faibles réserves durant la première campagne. Un accroissement net des teneurs en eau des trois horizons du sol est constaté au cours de la deuxième campagne (figure 6). L'eau des précipitations montre une courbe évolutive parallèle à celle des réserves hydriques. Les cultures peuvent trouver de l'eau dans ce sol sauf durant les mois estivaux où elle devrait être fortement retenue à la matrice du sol par une succion très élevée. La deuxième campagne a permis d'accumuler de meilleures réserves en eau dans le sol qui ne se sont totalement épuisées qu'en juin 1998 malgré la mise en culture du sol par de l'orge.

Les rendements des cultures sur les quatre types de sols

Afin d'évaluer l'impact des réserves hydriques dans les quatre types de sols sur les rendements des cultures introduites au cours des deux campagnes d'observation, une tentative de trouver une relation est entreprise ci-dessous.

Les cultures conduites sur les quatre types de sols sont différentes d'une année à l'autre, mais on discerne nettement les rendements modérés ou très faibles de la première campagne.

Le vertisol a des potentialités de production qui peuvent facilement fournir 40 q/ha en blé dur sous un bioclimat de type subhumide. La variété très productive Karim n'a permis d'obtenir que 24 q/ha au cours de cette campagne. Sur le sol isohumique, la situation est particulièrement dramatique puisque le rendement du blé tendre n'a atteint que 2 q/ha. Les pluies reçues par ce sol ont été très faibles au cours de cette campagne. Les rendements se sont nettement

améliorés au cours de la deuxième campagne avec pour le blé dur, 33,3 q/ha sur le sol peu évolué du bioclimat subhumide ; pour la betterave, 30 tonnes/ha de racines et pour l'orge respectivement 15 et 20 q/ha de grains dans le sol isohumique et le sol peu évolué du bioclimat semi-aride (tableau 5).

L'effet des teneurs en eau dans les quatre types de sols est ainsi évident sur les rendements. L'augmentation des taux d'humidité des sols s'est répercutée positivement sur les productions et tout effort d'accroissement des rendements en intervenant sur les autres facteurs de production (travail du sol, engrais, variétés, etc.) n'est réalisable qu'au cours des bonnes années, semblables à celle de la campagne 1997-1998. Pour la première campagne (1996 – 1997), les teneurs en eau sont faibles, notamment pour le milieu semi-aride et l'eau est, dans ce cas, un facteur limitant ne permettant pas aux autres éléments de s'exprimer et d'avoir l'effet recherché sur les cultures.

Certainement, les teneurs en eau sont tributaires de la pluviométrie et également de la façon de travailler les sols pour exploiter au maximum les hauteurs pluviométriques reçues (figure 1), notamment avant le semis et après la sécheresse estivale. Un tel sujet a été abordé par de nombreux auteurs et particulièrement par Ben Khéil (1989) et Slama (1989) dont les travaux menés sur des sols tunisiens apportent des conseils précis sur la préparation des sols pour le meilleur stockage des réserves hydriques, utiles pour la suite de la saison agricole.

DISCUSSION

Si l'on admet que la teneur en eau au point de flétrissement permanent devrait être étroitement liée à la composition granulométrique de l'échantillon (Schofield et Botelho Da Costa, 1935 et Périgaud, 1963 ; Hénin, 1977), on constate que les résultats des tests de corrélation entre CEC et WB qui montrent des coefficients de détermination R^2 significatifs pour les types de sols du milieu subhumide uniquement (tableau 4), ne confirment pas entièrement cette hypothèse. En effet, la valeur de pF 4,2 (ou WB dans ce cas) devrait dépendre du % d'argile dans le sol et comme la CEC est liée

Tableau 5 - Rendements des cultures sur les quatre types de sols, au cours des campagnes 1996-1997 et 1997-1998

Table 5 - Crop yields on each of the four types of soil in 1997 and 1998

Bioclimat	Type de sol	Campagne 1996-1997	Campagne 1997-1998
Sub-humide	Vertisol	Blé dur Karim : 24 q/ha de grains	Betterave : 30 t/ha de racines
	Sol peu évolué	Vesce-orge : 22,6 t/ha de matière verte	Blé dur Karim : 33,3 q/ha de grains
Semi-aride	Sol isohumique	Blé tendre : 2 q/ha de grains	Orge : 15 q/ha de grains
	Sol peu évolué	Jachère	Orge : 20 q/ha de grains

Figure 2 - Teneurs en eau pondérales aux points d'entrée d'air (WB) et de gonflement maximum (WD) des peds primaires, et à la limite de retrait inter-agrégat (WE) des échantillons des quatre profils de sols céréaliers au Nord-Ouest tunisien

Figure 2 - Gravimetric soil water content in the points of air entrance (WB) and the maximum swelling (WD) of primary peds, and in the shrinkage inter-ped limit (WE) of the four profiles of cereal soils in the tunisian North-West

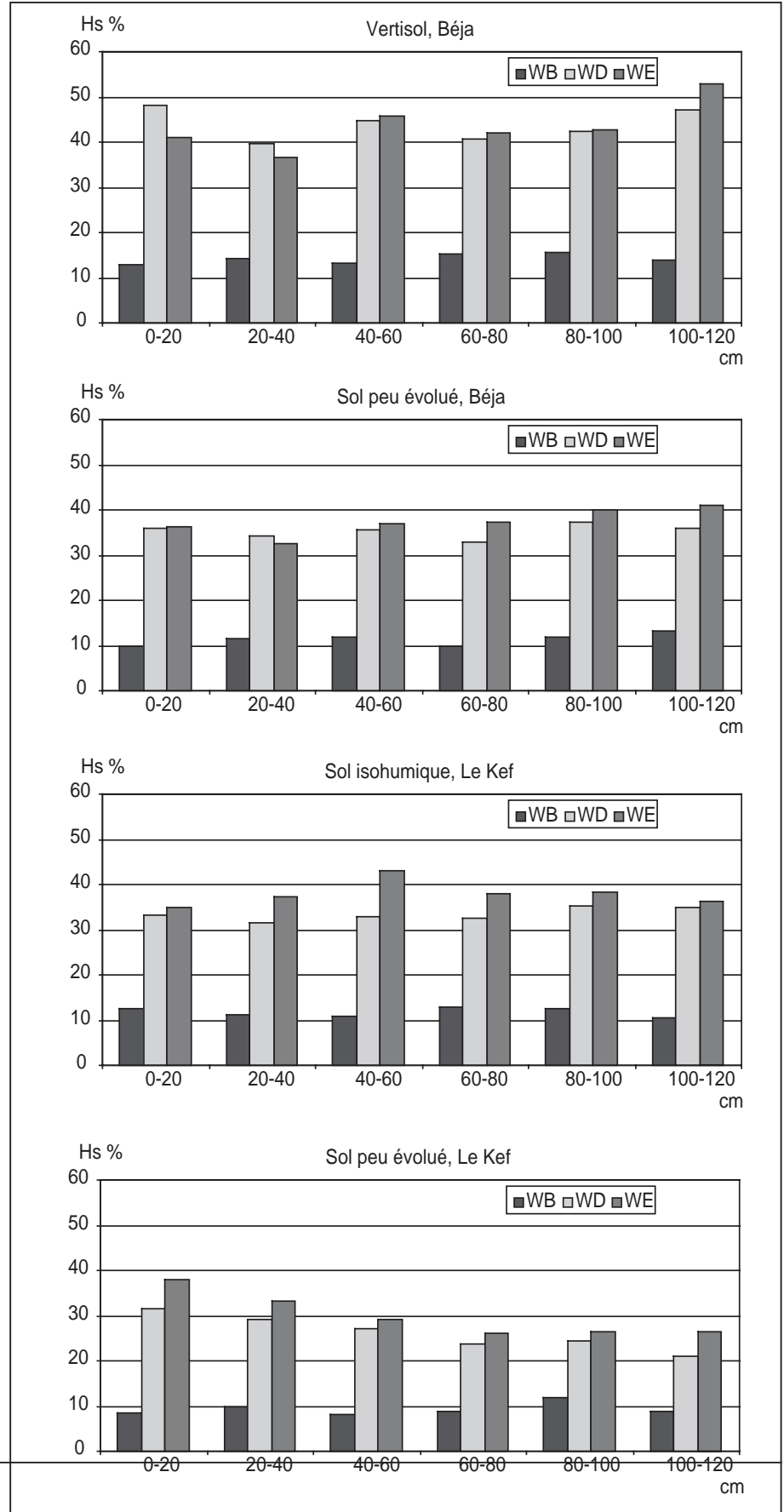


Figure 3 - Evolution de la pluviométrie et des réserves hydriques mensuelles (mm) des horizons supérieurs (0-60 cm) du vertisol du milieu subhumide. Campagnes de 1996-1997 et 1997-1998

Figure 3 - Rainfall time series and the monthly water reserves (mm) of the upper horizons (0-60 cm) of the Vertisol in the sub-wet area, for 1996-1997 and 1997-1998

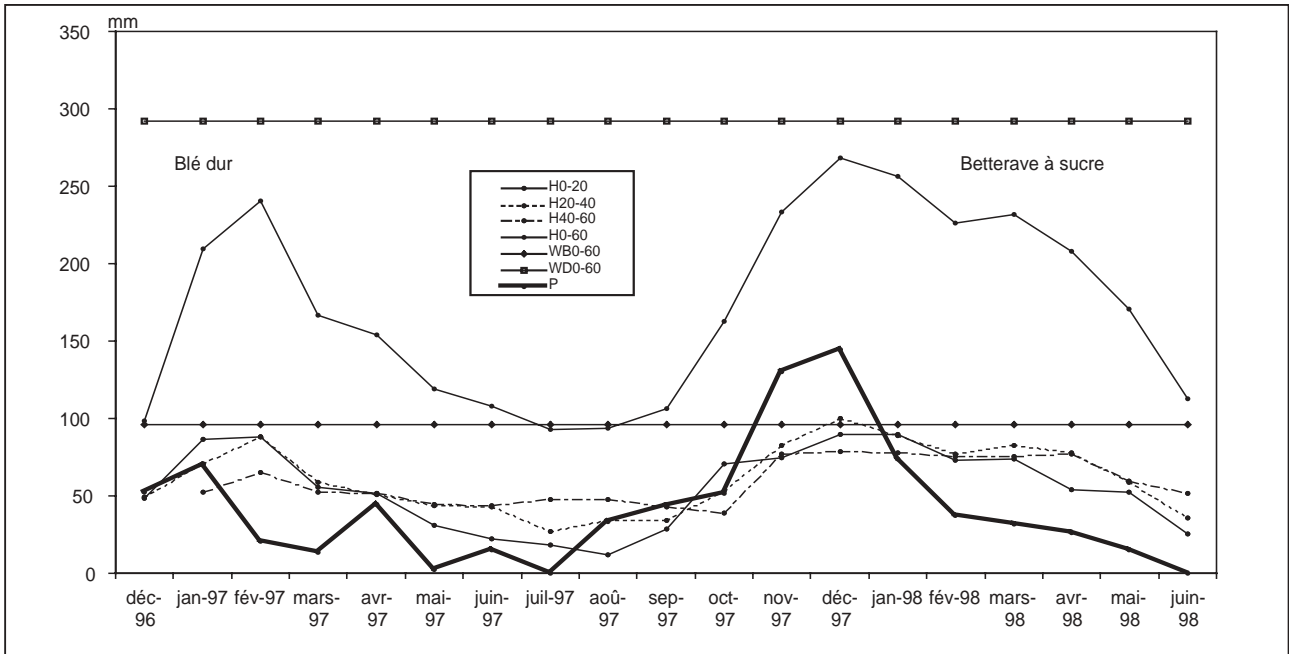


Figure 4 - Evolution de la pluviométrie et des réserves hydriques mensuelles (mm) des horizons supérieurs (0-60 cm) du sol peu évolué du milieu subhumide. Campagnes de 1996-1997 et 1997-1998

Figure 4 - Rainfall time series and the monthly water reserves (mm) of the upper horizons (0-60 cm) of the weakly developed soil in sub-wet area, for 1996-1997 and 1997-1998

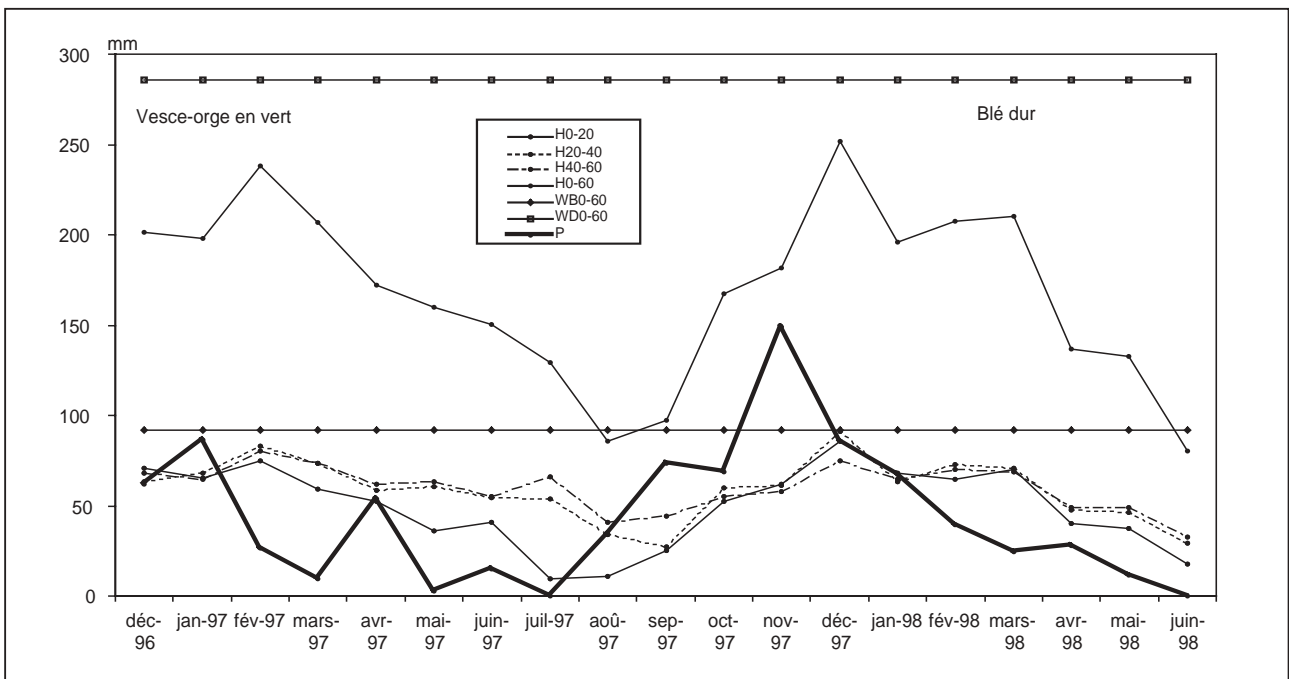


Figure 5 - Evolution de la pluviométrie et des réserves hydriques mensuelles (mm) des horizons supérieurs (0-60 cm) du sol isohumique du milieu semi-aride. Campagnes de 1996-1997 et 1997-1998

Figure 5 - Rainfall time series and the monthly water reserves (mm) of the upper horizons (0-60 cm) of the isohumic soil in the semi-arid area, for 1996-1997 and 1997-1998

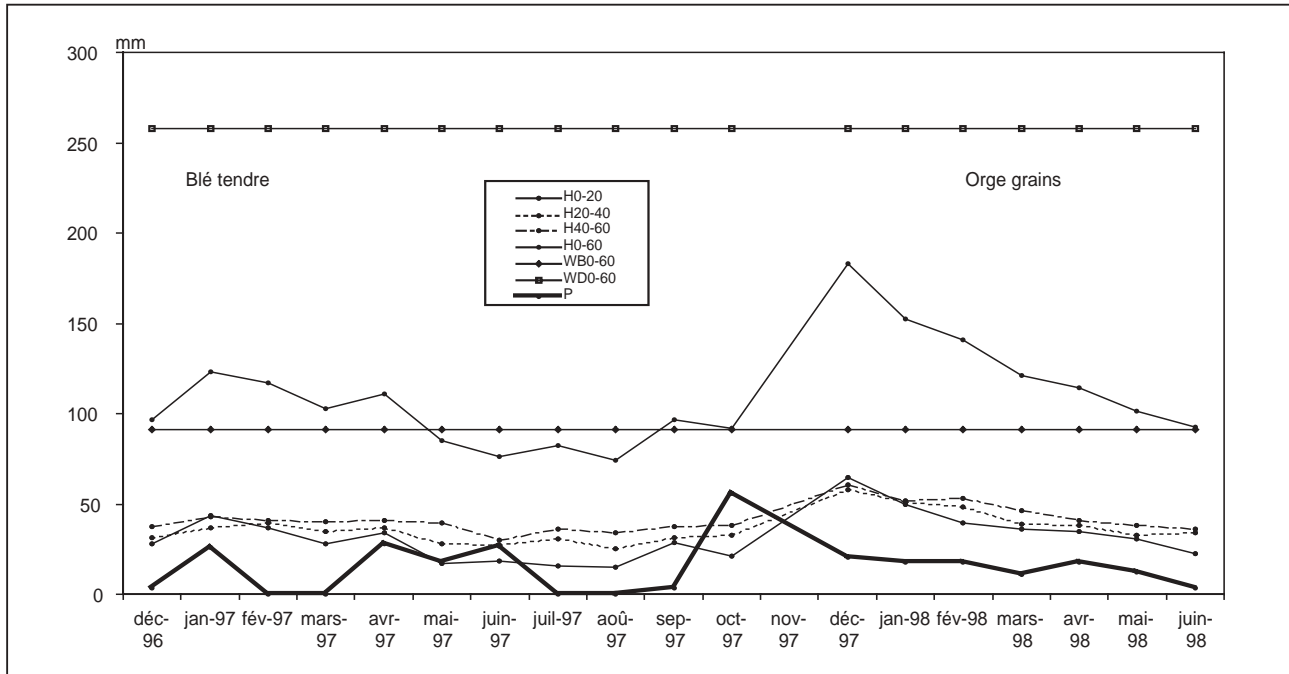
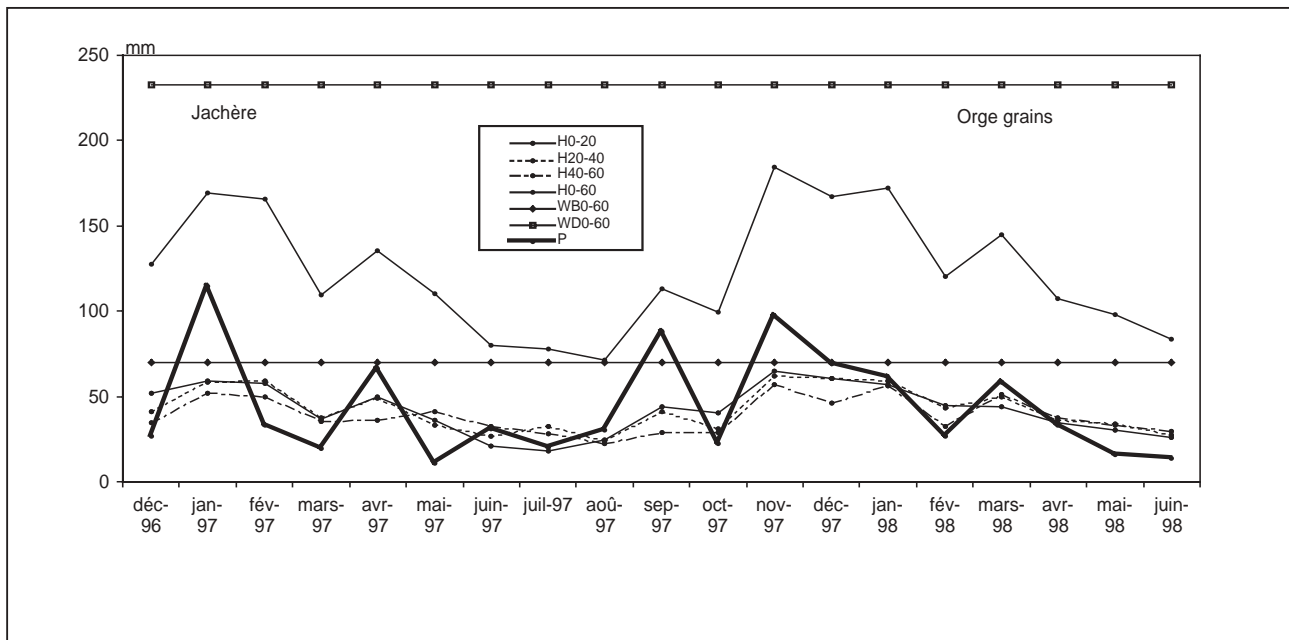


Figure 6 - Evolution de la pluviométrie et des réserves hydriques mensuelles (mm) des horizons supérieurs (0-60 cm) du sol peu évolué du milieu semi-aride. Campagnes de 1996-1997 et 1997-1998

Figure 6 - Rainfall time series and the monthly water reserves (mm) of the upper horizons (0-60 cm) of the weakly developed soil in the semi-arid area, for 1996-1997 and 1997-1998



à l'argile minéralogique, mais ici avec une faible participation de la matière organique, théoriquement une corrélation devrait exister entre WB et CEC. Ceci n'est vérifié dans cette étude que pour les sols les plus lourds et présentant des caractères vertiques. Les raisons probables d'un tel résultat seraient les suivantes :

- La fraction argileuse du sol n'est pas constituée par des argiles minéralogiques pures. Des particules de calcaire, de quartz, de micas, etc. font partie de cette fraction (Ben Hassine, 2002) et ne participent pas à la CEC, ce qui affaiblirait davantage la relation entre CEC et WB dans les sols les moins argileux de la région du Kef.

- La CEC des argiles minéralogiques varie selon le type d'argile : elle est forte pour les montmorillonites et faible pour les kaolinites et les illites (Duchaufour, 1991). Lorsque la montmorillonite est dominante (cas des vertisols et des sols peu évolués vertiques), une corrélation devrait exister, dans ces conditions, entre CEC et WB.

Par ailleurs, la relation entre l'humidité au pF 4,2 et le point WB relatif à l'entrée d'air dans les agrégats primaires peut être considérée comme étroite et réelle. En effet, lorsque l'air rentre dans le plasma argileux, une rupture de la continuité capillaire s'établit et l'eau ne peut plus venir au contact des racines pour remplacer celle qu'elles ont absorbée (Braudeau, 1988). C'est à partir de ce point que les espèces végétales n'arrivent plus à extraire l'eau du sol, du fait qu'elle est retenue avec une intensité excédant les possibilités d'extraction par leurs racines (Morel, 1989).

L'humidité équivalente (H.E.) varie essentiellement selon la texture du sol (avec la matière organique). Elle a été liée à la texture par les équations suivantes :

- $CR = 0,60 A + 0,19 L + 0,96 M.O. + 4,11$ (Gras, 1988 - Morel, 1989)

- $HE = 0,34 A + 0,90 M.O. + 10,8$ (Osty, 1971 - Morel, 1989)

Elle est déterminée au laboratoire en exerçant une pression propre à chaque type de texture (Morel, 1989) :

- Terres argileuses : 1 bar (pF = 3)
- Terres limoneuses : 0,33 bar (pF = 2,5)
- Terres sableuses : 0,1 bar (pF = 2)

Il faut cependant rappeler que l'humidité équivalente est réalisée sur la terre fine.

Pour les sols étudiés dont la texture est lourde (argileuse à argilo-limoneuse), le pF adopté par les laboratoires tunisiens est de 2,7 à 2,8 (0,63 bar environ). C'est une méthode commune pour des analyses habituelles, retenue probablement pour tenir compte de la diversité texturale des sols (Naânaâ et Susini, 1988). La détermination de l'eau du plasma du sol par la méthode rétractométrique apparaît plus pertinente, puisqu'elle rend compte de l'organisation du sol non perturbé et elle est spécifique à l'échantillon de sol et à son comportement lors de la phase de retrait. Une telle méthode permet de conserver l'organisation initiale des sols. Les résultats obtenus par les tests de corrélation entre d_a et capacité de rétention ou WD (tableau 4) montrent que le coefficient de détermination R^2 est significatif pour les types de sols les moins argileux (ceux de la région du Kef). Ce paramètre (d_a), mesuré sur le terrain, serait donc à des

valeurs proches de la réalité dans les sols les moins gonflants.

Les équations signalées ci-dessus et citées par Morel (1989) associent à la texture du sol une autre variable qui est la matière organique dont le rôle sur l'édification de la structure et par conséquent sur la densité apparente est connu. La composition granulométrique ne peut donc pas à elle seule être une caractéristique suffisante pour estimer les propriétés de rétention en eau du sol. Jamagne *et al.* (1970), Bruand *et al.* (1996) ont démontré que les réserves hydriques déterminées sur des échantillons remaniés surestiment la capacité au champ du sol. Encore une fois, la méthode rétractométrique qui peut utiliser des échantillons non perturbés serait une solution adaptée pour mieux évaluer les réserves hydriques du sol et caractériser en même temps ses propriétés structurales.

Ainsi, le paramètre réserves utiles peut être estimé par méthode rétractométrique. Les résultats obtenus sur l'évolution des teneurs en eau des quatre types de sols céréaliers peuvent mener aux conclusions suivantes :

- Généralement, le premier horizon (0 – 20 cm) est celui qui retient le plus d'eau après les pluies et est également celui qui en perd le maximum durant les mois estivaux.

- La courbe d'évolution des réserves hydriques cumulées ondule avec les saisons : un maximum d'humidité est atteint durant les mois d'hiver et une chute extrême est observée au cours des mois d'été. Cette observation est presque générale pour les quatre types de sols et pour tous les horizons à quelques exceptions près.

- L'impact du bioclimat est évident : les sols du milieu subhumide sont mieux pourvus en eau durant les mois pluvieux. La période où le sol retient encore une réserve utile est plus longue. Dans la région méridionale (Le Kef), le sol du semi-aride supérieur (sol peu évolué) retient plus de réserves que celui du semi-aride moyen (sol isohumique).

- La différence entre les quatre types de sols au niveau du stockage de l'eau est évidente. Ce sont les vertisols qui retiennent le plus d'eau, suivis respectivement des sols peu évolués (subhumide), des sols peu évolués (semi-aride) et des sols isohumiques. Les deux premiers types de sols gardent des réserves utiles en quantités plus importantes et au cours d'un nombre plus élevé de mois dans l'année, puisqu'ils reçoivent plus d'eau. Le cycle cultural à adopter pour ces sols devrait être plus long que celui des sols du milieu semi-aride.

- Dans les quatre cas, la deuxième campagne a été meilleure du point de vue des teneurs en eau dans les sols, ce qui témoigne de l'irrégularité pluviométrique du milieu méditerranéen et incite à prendre les mesures adéquates pour stocker et protéger le maximum d'eau dans les sols. Un tel objectif peut être atteint en améliorant la structure des sols par des apports complémentaires de matière organique, ce qui est concrètement réalisable.

- Dans le cas des sols isohumiques, malgré la bonne aptitude de leurs propriétés physico-chimiques aux cultures céréaliers, les humidités stockées sont faibles d'une part et partent prématurément dans l'année, d'autre part. Des céréales à cycle cultural plus court

comme l'orge et les fourrages s'adaptent mieux avec le comportement hydrique de ces types de sols.

On doit signaler, en outre, que les régimes hydriques des sols, même s'ils apparaissent très liés à la pluviométrie dans cette étude, sont en réalité le résultat de l'interaction de plusieurs paramètres dont les plus importants sont : le type de sol, les précipitations reçues et leur répartition dans l'année, les cultures pratiquées et les travaux du sol réalisés.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Quatre types de sols parmi les meilleures unités aptes aux productions céréalières dans le Nord-Ouest tunisien ont été sélectionnés pour leur caractérisation analytique et pour le suivi de l'évolution des teneurs en eau de leurs horizons superficiels, au cours de deux campagnes agricoles et sur des cultures conduites en sec.

Ces sols se distinguent non seulement par leur milieu bioclimatique, mais aussi par la nature de leur matériau et par l'évolution pédogénétique qui les a affectés. L'origine marneuse des sols du milieu subhumide les distingue des sols du milieu semi-aride surtout par leur texture plus lourde et leur capacité d'échange cationique plus élevée. De tels résultats confirment la spécificité de chaque région au niveau des facteurs de la pédogenèse qui sont étroitement liés à la station. Cela n'exclut pas, de toute façon, leur commune aptitude pour les cultures annuelles et céréalières particulièrement.

Le suivi mensuel des teneurs en eau de ces quatre types de sols a abouti à établir des courbes d'évolution pour les trois horizons supérieurs de chaque profil et pour leurs valeurs cumulées. L'allure des courbes est fonction de la saison et reflète nettement l'effet du bioclimat. Dans le milieu le plus aride, le nombre de mois où le sol est humecté est très réduit notamment durant les années les plus sèches. Des cultures à cycle végétatif plus court tel que l'orge sont celles qui s'adaptent le mieux à ces milieux. Dans les zones bioclimatiques plus humides, la teneur en eau reste supérieure à la ligne représentant le point de flétrissement permanent (WB), pratiquement d'octobre à juin, dans tous les horizons. Au niveau de la distribution de l'eau en fonction de la profondeur, ce sont les horizons de surface qui retiennent le maximum d'humidité, rétention qui diminue progressivement. Les teneurs en eau se rapprochent bien, durant deux ou trois mois seulement (décembre, janvier et février), du point de rétention en eau maximale (WD), pour chuter progressivement au cours du printemps et atteindre des valeurs très basses en été. La période de chute est, bien entendu, plus longue pour les cultures à court cycle végétatif.

Enfin, un examen des rendements obtenus sur ces sols au cours des deux campagnes, montre le lien évident entre les années durant lesquelles le sol est humecté par des quantités d'eau plus élevées se répartissant sur un nombre de mois plus important, et le rendement des cultures. Les techniques de travail du sol favorisant le stockage de l'eau dans le sol, conclusion à laquelle a abouti l'étude cartographique des sols aptes aux cultures céréalières (Souissi,

1986), notamment dans les horizons compris entre 20 et 60 cm, sont à adopter. La nature de ces travaux est définie par certains auteurs (Ben Khéllil, 1989; Slama, 1989). Les capacités de rétention en eau de ces sols sont largement suffisantes pour conserver toutes les eaux infiltrées par un bon travail du sol.

Cette étude n'a pas pris en compte l'apport d'éléments fertilisants sur les rendements et particulièrement l'azote dont les mouvements sont liés à ceux de l'eau. D'autres études réalisées par Ben Hassine *et al.* en 1998, 1999 et 2001 ont concerné cet aspect de l'amélioration des techniques culturales en milieu céréalier.

BIBLIOGRAPHIE

- 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, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, pages 35-136.
- Ben Hassine H., 2002 - Etude de l'évolution des propriétés chimiques et physico-hydriques des principaux types de sols céréaliers du Nord-Ouest tunisien. Effets sur les productions céréalières. Thèse, Université de Provence, Aix-Marseille I, 299 pages.
- Ben Hassine H., Aloui H., et Amdouni M., 1998 - Evolution mensuelle des réserves en azote minéral dans deux types de sols céréaliers, sous climat subhumide du Nord-Ouest de la Tunisie. Document interne, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 22 pages.
- Ben Hassine H., Gasmi M., Marzouki M. et Younsi A., 1999 - Etude de l'évolution mensuelle des réserves hydriques et de l'azote minéral dans deux types de sols céréaliers de la région du Kef. ES 308, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 25 pages.
- Ben Hassine H., Gasmi M., Aloui H., Marzougui M., Amdouni M. et Younsi A., 2001 - Suivi de l'évolution des réserves en phosphore assimilable et en potassium échangeable dans quatre types de sols céréaliers des régions de Béja et du Kef campagnes agricoles de 1996-1997 à 1999-2000. ES 314, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 26 pages.
- Ben Khéllil M.K., 1985 - Techniques de préparation du sol en grande culture. Bulletin « Sols de Tunisie », n° 13, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, pages 167-185.
- Bigorre F., Tessier D. et Pédro 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 245-250.
- Bortoli L., Gounot M. et Jacquinet J.-P., 1969 - Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie septentrionale. Annales de l'INRAT, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, pages 105-158.
- Braudeau E., 1988 - Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol basé sur l'étude de la courbe de retrait. C.R. Acad. Sci. Paris, 307, série II: 1933-1936.
- Braudeau E., 1988 - Méthode de caractérisation pédo-hydrrique des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 24: 179-189.
- Braudeau E., 1995 - Caractérisation des propriétés hydro-structurales des sols dans les périmètres irrigués de Tunisie: la rétractométrie, nouvelle méthode de caractérisation physique des sols. ES 286, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 24 pages.
- Braudeau E., 2001 - Pédostucture et caractérisation pédohydrrique. Bulletin « Sols de Tunisie », numéro spécial 2001, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, pages 19-50.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R. et Jamagne M., 1996 - Variabilité

- des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 1, 1996, pages 27-40.
- Chettaoui T., 1975 - Classification des sols tirée du cours de pédologie de G. Aubert. ES 92, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 22 pages.
- CPCS, 1967 - Classification des sols, édition de 1967. INRA, France, 96 pages.
- Damagnez J., 1958 - Les propriétés hygroscopiques des sols et les apports secondaires d'humidité. Importance du mulch naturel. *Annales agronomiques*, livraison n° 5 de 1958, pages 659-676.
- Duchaufour P., 1991 - Pédologie. Sol, végétation, environnement. Masson, Paris, pages 91-100.
- Hénin S., 1977 - Cours de physique du sol, volume 2. Initiations - Documentations techniques, n° 29, ORSTOM, Paris, 222 pages.
- Khalfallah S., 1985 - Evaluation du potentiel de production des sols à céréales du Nord de la Tunisie. *Bulletin « Sols de Tunisie »*, n° 13, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, pages 133-149.
- Loyer J.-Y., 1970 - Etude pédologique de l'URD de Garn Halfaya. Etude n° 412, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 36 pages.
- Morel R., 1989 - Les sols cultivés. Technique et Documentation - Lavoisier, 373 pages.
- Mori A., 1968 - Etude pédologique de l'URD de Béja. Etude n° 341, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 54 pages.
- Naânaâ W. et Susini J., 1988 - Méthodes d'analyse physique et chimique des sols. ES 252, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 118 pages.
- Slama A., Ben Salem M. et Zid E., 2000 - Evolution du développement du système racinaire chez deux variétés de blé dur sous deux régimes hydriques. *Laboratoire de physiologie végétale*, INRAT, Tunisie, 11 pages.
- Slama F., 1989 - La culture du blé. Quelques aspects agronomiques et physiologiques. *Bulletin « Sols de Tunisie »*, n° 13, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, pages 125-131.
- Souissi A., 1966 - Etude pédologique de l'URD du Kef. Etude n° 309, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 89 pages.
- Souissi A., 1986 - Note relative à la carte des sols aptes à la céréaliculture, échelle : 1/300 000. ES 232, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 7 pages et une carte.
- Zebidi H., 1971 - Carte des ressources en eau souterraine de la Tunisie à l'échelle 1/200 000. Feuille du Kef, 18 pages.
- Zidi C. et Braudeau E., 1998 - Le rétractomètre. Mode d'emploi et utilisation pour la caractérisation hydro-structurale des sols. ES 303, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 25 pages.

