

Caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'un sol de la Bekaa (Liban) sur les rives du fleuve Litani

M. Chalhoub_(1,2), P. Vachier₍₁₎, Y. Coquet₍₁₎, T. Darwish₍₃₎, L. Dever₍₂₎ et M. Mroueh₍₄₎

- 1) UMR 1091 INRA-AgroParisTech EGC, BP 01, 78850 Thiverval Grignon, France
- 2) UMR 8148 CNRS-UPS, Bât 504, Université Paris Sud, 91405 Orsay, France
- 3) National Center for Remote Sensing. CNRS, Beyrouth, Liban
- 4) Université Libanaise, Faculté d'agronomie, Beyrouth, Liban

RÉSUMÉ

L'agriculture intensive pratiquée dans la plaine de la Bekaa (Liban) amène des quantités d'intrants élevées et entraîne une forte contamination des eaux souterraines. L'étude des propriétés hydrodynamiques des sols est un prérequis pour la résolution de ce problème de contamination. En effet, ces propriétés sont indispensables à la caractérisation quantitative des flux d'eau et de solutés dans le sol. Cet article présente une caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'un sol largement représenté dans le secteur agricole de la plaine de la Bekaa. La relation entre la teneur en eau du sol et le potentiel de l'eau nous a permis d'identifier un système à porosité bimodale de rayons équivalents principaux 0,1 mm ($pF=1,18$) et 8,4 μm ($pF=3,25$). Au point de flétrissement de la plante ($pF 4,2$), on observe une teneur en eau volumique résiduelle importante de l'ordre de 20 % qui peut amener à penser que la fraction d'eau immobile dans le sol pourrait être assez importante. La réserve utile de ce sol est faible, de l'ordre de 57 mm d'eau pour 60 cm de sol. La relation entre conductivité hydraulique et potentiel de l'eau, mesurée avec l'infiltromètre à disque à des potentiels matriciels allant de -15 à -1 cm, montre une variabilité importante dans la couche labourée de l'horizon A. La conductivité hydraulique de l'horizon C est plus faible que celle de l'horizon A pour tous les potentiels. Cette différence semble liée à l'abondance des éléments grossiers qui augmente avec la profondeur. La teneur en eau mobile la plus grande a été observée dans l'horizon labouré (LAg) et celle la plus faible dans l'horizon C. Elle est respectivement de 0,19 cm^3cm^{-3} pour l'horizon labouré et de 0,03 cm^3cm^{-3} pour l'horizon C au potentiel matriciel -6 cm. Une tendance à l'augmentation de la fraction mobile avec le potentiel matriciel de l'eau dans le sol a été observée mais celle-ci semble aussi influencée par l'abondance des éléments grossiers.

Mots clés

Sol labouré, éléments grossiers, rétention d'eau, conductivité hydraulique, fraction d'eau mobile.

SUMMARY**CHARACTERISATION OF THE HYDRAULIC PROPERTIES OF A SOIL IN THE BEKAA VALLEY (LEBANON) ON A RIVERBANK OF LITANY**

Intensive agriculture in the Bekaa valley brings large inputs of pesticides and fertilizers and leads to an important contamination of the local groundwater. The Bekaa valley represents 42 % of the total agricultural surface in Lebanon. Knowledge of the hydrodynamic properties of the soils of the Bekaa valley is a prerequisite for the resolution of groundwater contamination by agricultural pollutants. This article presents a characterisation of the hydrodynamic properties of a soil largely represented in the agricultural sector of the Bekaa valley. The relation between water content and water potential allowed us to identify a porosity system with two modes with principal equivalent radii of 0.1 mm ($pF= 1.18$) and 8.4 μm ($pF= 3.25$). At the plant wilting point ($pF 4.2$), we observe an important residual water content of about 20 %. This water content brought us to think that the fraction of immobile water could be rather important in this soil. The available water storage is low, about 57 mm of water for 60 cm of soil. The hydraulic conductivity – water potential relation measured with a disc infiltrometer at different matric potentials from -15 cm up to -1 cm shows an important variability in the ploughed layer of horizon A. The hydraulic conductivity of the horizon C is smaller than that of the horizon A at all matric potentials. This difference is also related to the abundance of coarse elements which increases with depth. The highest mobile water content is observed in the ploughed layer of horizon A and the lowest in the horizon C. The mobile water content is respectively of about 0.19 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ for the ploughed layer and 0.03 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ for the horizon C at matric potential -6 cm. A tendency to the increase of the water mobile fraction with matric potential was observed but was also influenced by the abundance of the coarse elements.

Key-words

Ploughed soil, coarse elements, water retention, hydraulic conductivity, mobile water fraction.

RESUMEN**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DE UN SUELO DE LA BEKAA (LÍBANO) EN LAS ORILLAS DEL RIO LITANI**

La agricultura intensiva que se practica en la planicie de la Bekaa (Líbano) trae cantidades elevadas de insumos e implica una fuerte contaminación de las aguas subterráneas. El estudio de las propiedades hidrodinámicas de los suelos está un requisito previo para la resolución de este problema de contaminación. En efecto, estas propiedades están indispensables para la caracterización cuantitativa de los flujos de agua y de las soluciones en el suelo. Este artículo presenta una caracterización de las propiedades hidrodinámicas de un suelo fuertemente representado en el sector agrícola de la planicie de la Bekaa. La relación entre el contenido en agua del suelo y el potencial del agua permitió identificar un sistema con porosidad bimodal de radios equivalentes principales 0,1 mm ($pF=1,18$ et 8,4 ($pF=3,25$). Al punto de marchitez de la planta ($pF 4,2$), se observa un contenido en agua volumétrica residual importante del orden de 20 % que puede llevar a pensar que la fracción de agua inmóvil en el suelo podría estar bastante importante. La reserva en agua aprovechable de este suelo está pequeña, del orden de 57 mm de agua por 60 cm de suelo. La relación entre conductividad hidráulica y potencial del agua medida con infiltómetro con disco para potenciales matriciales que van de - 15 a - 1 cm, muestra una variabilidad importante en la capa arada del horizonte A. La conductividad hidráulica del horizonte C está más pequeña que la del horizonte A para todos los potenciales. Esta diferencia parece ligada a la abundancia de los elementos gruesos que aumentan con la profundidad. Se observó el contenido en agua móvil lo más importante en el horizonte arado (LAg) y lo más pequeño en el horizonte C. Está respectivamente de 0,19 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ para el horizonte arado y de 0,03 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ para el horizonte C al potencial matricial -6 cm. Se observó una tendencia al aumento de la fracción móvil con el potencial matricial del agua en el suelo pero parece influenciada por la abundancia de los elementos gruesos.

Palabras clave

Suelo arado, elementos gruesos, retención en agua, conductividad hidráulica, fracción de agua móvil.

INTRODUCTION

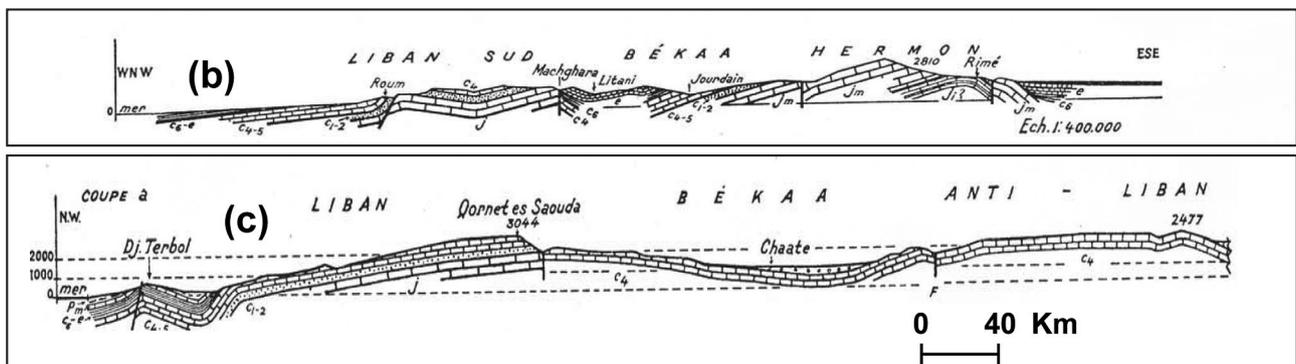
Le Liban, comme la plupart des pays de l'Est du Bassin Méditerranéen, a un climat caractérisé par l'existence d'une saison sèche très marquée (voir annexe I) qui s'étend de mars à octobre (Atlas climatique du Liban, 1977). Ceci est d'autant plus vrai que l'on s'éloigne de la plaine côtière en allant vers l'Est vers le désert syrien. C'est pourquoi, pour tous les pays du Moyen-Orient, la maîtrise physique de l'eau est un problème crucial dans la mesure où leur production agricole dépend quasi totalement de l'irrigation.

Les deux chaînes montagneuses du Liban et de l'Anti-Liban, parallèles à la côte (figure 1a), dont les points culminants atteignent 3088 m pour le mont Liban (Qornet es Saouda) et 2814 m pour le mont Hermon (Anti-Liban), servent de « châteaux d'eau ». Les précipitations hivernales abondantes sous forme de neige alimentent, lors de la fonte, les karsts jurassiques et crétacés (Shaban, 2003; Sadek, 2005) qui donnent, tout au moins pour la chaîne du Liban, de nombreuses résurgences le long de la faille du Levant notée F dans la figure 1 située à l'Ouest de la plaine de la Bekaa. Ces résurgences alimentent les deux seuls fleuves permanents qui coulent au Liban et dans la plaine de la Bekaa : « l'Oronte (Aassi) » au nord de Baalbek, et « Le Litani » au sud. Le Litani est le seul fleuve à s'écouler entièrement en territoire libanais. La surface de son bassin versant est de 2140 km². Au sud, au pied de l'Anti-Liban, se trouve le Nahr El Hasbani (ou Jourdain) qui, après quelques kilomètres, pénètre en Israël.

Au Liban, les précipitations sont abondantes, estimées à environ 823 mm (Ecodit, 2001; Shaban, 2003). Elles alimentent, en plus des deux fleuves suscités, 38 cours d'eau de surface dont 6 sont permanents. L'abondance relative de l'eau doit cependant être tempérée par deux facteurs: le fait que la plupart des rivières qui s'écoulent vers la plaine côtière ont une pente très forte et ne sont pas maîtrisables, et que, durant la période de végétation, la demande évapotranspiratoire dans la plaine de la Bekaa est très élevée (Sadek, 2005) et nettement supérieure à la réserve hydrique des sols.

Figure 1 - (a) Carte géographique du Liban (d'après www.quid.fr) (b) Coupe transversale du Liban à la hauteur de Machghara soit 10 km au sud de notre zone de travail montrant les séries crétacée (avec (C1) : grès de base; (C2) : Aptien ; (C4): Cénomaniens; (C5) : Turonien; (C6) : Sénonien), jurassique (j) (avec (jm) : jurassique moyen) et (e) : Eocène; (c) profil de la surface structurale du jurassique transversal au Liban et à l'Anti-Liban avec F : faille du Levant (Dubertret, 1955)

Figure 1 - (a) Geographic map of Lebanon (from www.quid.fr) (b) Cross section of Lebanon at the location of Machghara, 10 km south of our experimental field showing the series of Cretaceous (with (C1): basic sandstone, (C2): Aptian ; (C4): Cenomanian ; (C5): Turonian ; (C6): Senonian), Jurassic (j) (with (jm): middle Jurassic) and (e): Eocene ; (c) profile of the structural surface of Jurassic across the Lebanon and anti Lebanon mounts with F: fault of Levant (Dubertret, 1955)



Quarante-deux pour cent de la surface agricole du Liban se situent dans la plaine de la Bekaa et 52 % de ces terres sont irriguées, essentiellement par irrigation gravitaire (Darwich *et al.*, 2002; Atlas du Liban, 2004). L'extension des zones agricoles irriguées, l'excès en eau apporté avec les techniques d'irrigation, les apports importants d'engrais et de pesticides par les pratiques agricoles, la croissance de la population, le développement industriel (El-Fadel *et al.*, 2000; Korfali et Davies, 2004) sont autant de facteurs ayant entraîné la contamination des nappes souterraines superficielles de la plaine de la Bekaa (Darwich *et al.*, 2000). Des analyses faites par le Litani BAMAS (2005) montrent que les concentrations en nitrate dans 75 % des aquifères échantillonnés dans le bassin du Litani dépassent la norme de potabilité du ministère de l'environnement libanais (25 mg NO₃⁻/L). Ces concentrations élevées en nitrate sont la plupart du temps attribuées aux pratiques agricoles et à l'application incontrôlée des engrais qui s'accumulent dans le sol pendant la saison d'été et sont lessivés vers les eaux souterraines pendant la saison pluvieuse d'hiver. Les nitrates peuvent également être le sous-produit de composés azotés transformés (eaux d'égout, drainage des secteurs d'affouragement animal et des engrais de ferme) qui atteignent les eaux souterraines.

Pour pouvoir comprendre les mécanismes de contamination des eaux souterraines, nous avons étudié les propriétés hydrodynamiques d'un sol de la plaine de la Bekaa largement représenté dans ce secteur (Haplic Calcisol) (Darwich *et al.*, 2006). L'objectif du travail présenté ici est de déterminer expérimentalement ces propriétés.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le site expérimental

Le travail expérimental a été réalisé sur un site localisé à 500 m sur la rive droite du fleuve Litani dans la partie sud-est de la plaine de la Bekaa. Les coordonnées du profil de sol étudié sont: 33°38'19,96" de latitude nord, 35°46'15,25" de longitude est (Digital Globe, 2008). Ce profil est localisé sur une ancienne terrasse alluviale du fleuve et à une altitude de 863 mètres.

Il se situe à 1,5 km de l'entrée du village de Joub-Jannine et à 7,7 km dans la direction N-NE de l'extrémité nord du lac Qaraoun sur le domaine expérimental du périmètre irrigué du Litani sur la commune de Khirbet Kanafar. Les précipitations annuelles sur le site varient entre 800 et 900 mm. Ces pluies sont essentiellement hivernales avec une saison sèche très marquée qui va de fin avril à fin octobre (annexe I). L'évapotranspiration annuelle calculée sur le site est de 1200 mm.

Le profil pédologique

Une fosse pédologique de 6 m de largeur et de 2 m de profondeur a été creusée. La nappe y est remontée jusqu'à 1,2 m de profondeur le 25 février 2006. Durant la période d'étude, il y a eu de fortes précipitations (neige et pluie) fin février et ensuite un vent fort venant du sud et du nord du pays.

Le profil observé présente quatre horizons très contrastés. De 0 à 60 cm, on distingue 3 horizons de couleur homogène brun rouge (7,5YR4/4): un horizon LAg, de 0 à 30 cm, correspondant à la couche labourée par la charrue; une semelle de labour, de 30 cm à 34 cm de profondeur, correspondant à un horizon tassé par le passage de la charrue; l'horizon ACag, de 34 à 60 cm, non perturbé par le travail du sol, de structure polyédrique angulaire et stable. En dessous de 60 cm de profondeur, on trouve un horizon C, homogène, de couleur ocre (7,5YR6/3). Des échantillons

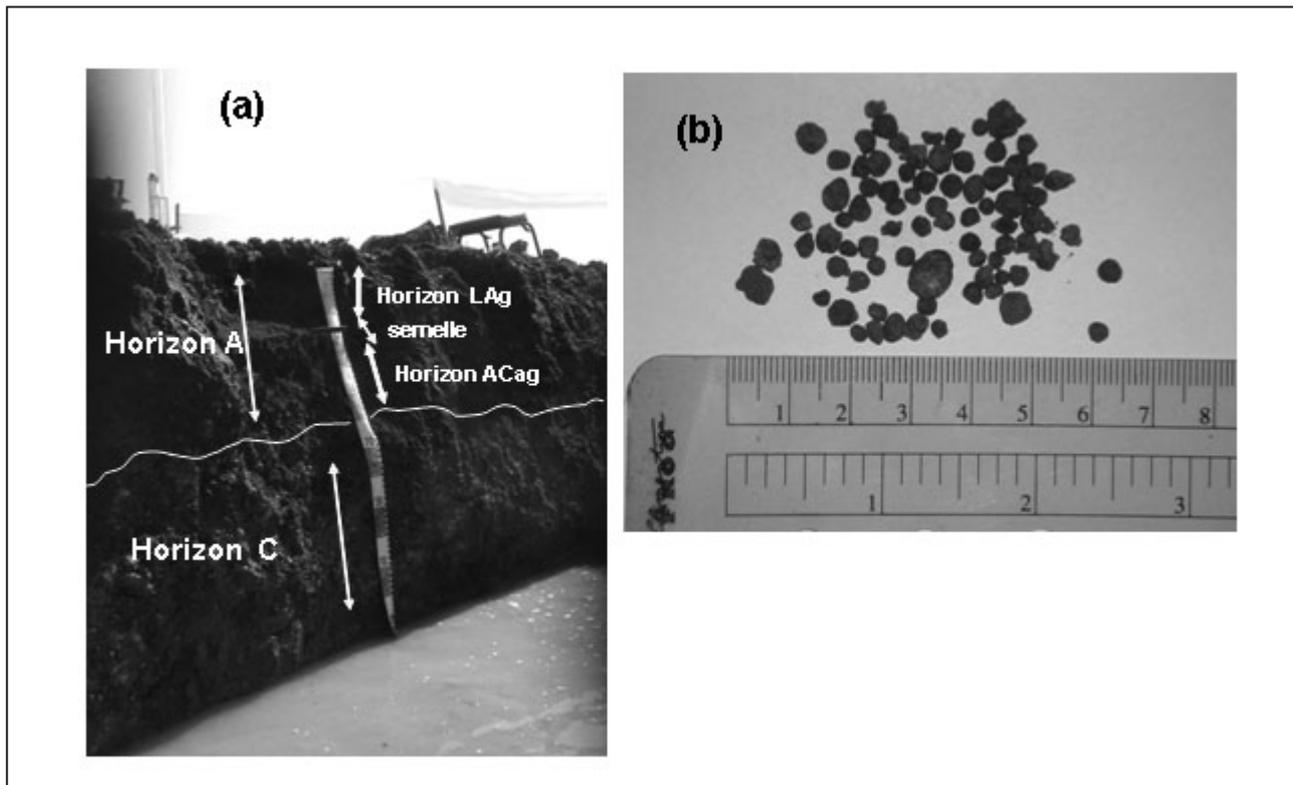
Tableau 1 - Analyses du sol sur la terre fine (≤ 2 mm)

Table 1 - Soil analysis on the ≤ 2 mm

Horizon	Argiles en % pondéral	Limons en % pondéral	Sables en % pondéral	pH	Calcaire total en % pondéral	Matière organique en % pondéral	CEC Metson (cmol+/kg)	Fer (mg/kg)	Manganèse (mg/kg)
LAg et semelle (0-34 cm)	32,9	18,6	48,5	8,22	4,03	1,42	18,1	39400	3380
ACag (34-60 cm)	33,9	20,4	45,7	8,27	6,39	1,42	18,4	40800	3720
Horizon C > 60 cm	37,8	31,4	30,8	8,40	29,0	0,72	18,1	45300	4330

Figure 2 - (a) Le profil de sol étudié (REDOXISOL, fluviatique, carbonaté) ; (b) concrétions ferromanganiques présentes dans l'ensemble de profil.

Figure 2 - (a) The soil profile (REDOXISOL fluviatique, carbonated); (b) Ferromanganic concretions present in all the profile.



ont été prélevés sur l'ensemble du profil et leur analyse granulométrique sur la terre fine (≤ 2 mm) a été réalisée (tableau 1).

De 0 à 60 cm, le sol a une texture argilo-sableuse (Jamagne, 1967, in Baize, 1988). La teneur en matière organique, déterminée par combustion à 1000 °C (Afnor, 1999a), est homogène dans l'ensemble des trois premiers horizons. On note une augmentation en profondeur de la teneur en CaCO_3 déterminée par calcimétrie volumétrique (Afnor, 1999b), de 40,3 g/kg dans la couche 0-34 cm à 63,9 g/kg dans la couche 34-60 cm. Le pH eau de ces horizons (Afnor, 1999c) varie de 8,22 à 8,27. La CEC est égale à 18 cmol (+)/kg avec une teneur en argile de 33 %, ce qui indique que la fraction argileuse contient probablement des smectites.

La limite entre l'horizon A et l'horizon C est nette et horizontale. L'horizon C, en dessous de 60 cm, a une texture argileuse. Sa couleur beaucoup plus claire est sans doute à mettre en relation avec une baisse de 50 % du taux de carbone organique et la présence importante de carbonate de calcium. Cet horizon présente une structure massive. La CEC dans cet horizon est de 18 cmol(+)/kg, similaire à celle des horizons sus-jacents. Ses teneurs en fer et manganèse sont plus élevées que celles des horizons supérieurs.

On note dans tout le profil de très nombreuses concrétions ferro-manganiques d'une taille souvent supérieure à 2 mm de diamètre. Les teneurs en fer et en manganèse sont vraisemblablement sous-estimées du fait que les concrétions de taille supérieure à 2 mm ont été exclues de l'analyse. La couleur à sec de ces concrétions est 7,5YR3/2 (figure 2b). La présence de concrétions ferro-manganiques jusque dans l'horizon de surface laisse penser que ce sol subit des submersions temporaires en période de hautes eaux (hypothèse vérifiée sur place). Ce sol est à classer comme un REDOXISOL, fluviatique, carbonaté (Baize, 1995).

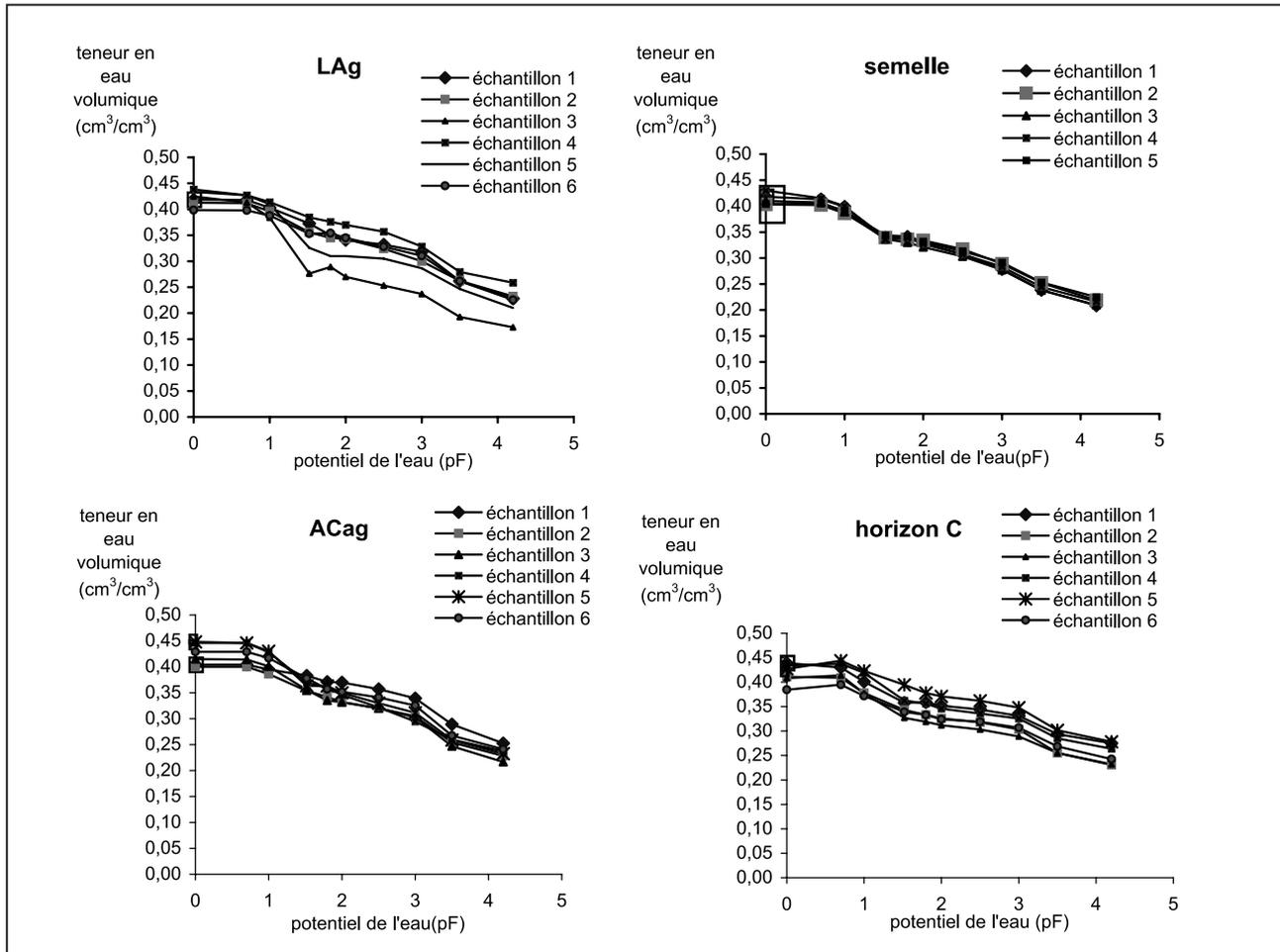
Caractérisation des éléments grossiers

L'abondance des éléments grossiers a été mesurée, sur le terrain, par tamisage avec un tamis de 2 mm. La masse volumique du solide et la masse volumique apparente ont été déterminées au laboratoire sur les échantillons prélevés pour la mesure de la courbe de rétention en eau. La masse volumique du solide a été déterminée par la méthode du pycnomètre à eau (Flint et Flint, 2002). La masse volumique apparente a été déterminée par poussée d'Archimède sur les éléments grossiers préalablement enrobés de paraffine.

Tableau 2 - Teneurs en éléments grossiers et de densité des éléments grossiers, mesurées avec la méthode du pycnomètre et celle à la paraffine pour chaque échantillon, (1) la moyenne géométrique.

Table 2 - Content in coarse elements and density of coarse elements, measured with pycnometer method and paraffine method for each sample, (1) the geometric mean.

		Teneur volumique (cm ³ /100.cm ³)	Densité mesurée avec le pycnomètre	Densité mesurée avec la paraffine	Porosité (cm ³ /100.cm ³)
LAg	échantillon 1	8,2	2,7	2,5	0,07
	échantillon 2	6,8	2,7	2,8	-0,02
	échantillon 3	12,4	2,6	2,6	0,00
	échantillon 4	12,0	2,7	2,5	0,07
	échantillon 5	4,5	2,7	2,9	-0,10
	échantillon 6	8,2	2,6	2,6	0,01
	moyenne¹	8,2	2,7	2,7	0,00
écart type	3,0	0,1	0,2	0,06	
Semelle	échantillon 1	8,8	2,7	2,6	0,02
	échantillon 2	12,8	2,7	2,6	0,02
	échantillon 3	8,3	2,6	2,7	-0,02
	échantillon 4	7,3	2,7	2,5	0,07
	échantillon 5	8,5	2,7	2,4	0,10
	moyenne	9,0	2,7	2,6	0,04
écart type	2,1	0,1	0,1	0,05	
Acag	échantillon 1	11,8	2,7	2,5	0,07
	échantillon 2	15,1	2,6	2,6	0,03
	échantillon 3	13,0	2,6	2,6	0,02
	échantillon 4	7,0	2,7	2,8	-0,04
	échantillon 5	5,5	2,6	2,8	-0,06
	échantillon 6	13,6	2,6	2,4	0,06
	moyenne	10,3	2,6	2,6	0,01
écart type	3,9	0,1	0,2	0,05	
C	échantillon 1	20,3	2,5	2,5	0,03
	échantillon 2	13,2	2,6	2,6	0,02
	échantillon 3	31,9	2,7	2,6	0,05
	échantillon 4	15,5	2,7	2,6	0,02
	échantillon 5	12,7	2,6	2,6	0,00
	échantillon 6	23,9	2,6	2,5	0,06
	moyenne	18,5	2,6	2,6	0,03
écart type	7,4	0,1	0,1	0,02	

Figure 3 - Caractéristiques de rétention en eau pour les différents échantillons de chaque couche du profil.**Figure 3** - Characteristics of water retention for all samples of each layer of the soil profile.

Mesure de la courbe de rétention d'eau $\theta(h)$

Des presses de Richards (Klute, 1986; Musy et Soutter, 1991) ont été utilisées pour mesurer l'évolution de la teneur en eau des échantillons en fonction de la pression appliquée sur ces échantillons. Des cylindres de 25 mm de hauteur et de 50 mm de diamètre ont été utilisés pour prélever les échantillons dans les différentes couches du profil de sol. Six échantillons ont été prélevés à 15 cm dans l'horizon LAg, 5 échantillons dans la semelle de labour, 6 entre 40 et 60 cm dans l'horizon ACag et 6 à 90 cm dans l'horizon C. La teneur en eau volumique a été mesurée pour les différents pF: 0,7; 1; 1,5; 1,8; 2; 2,5; 3; 3,5; 4,2. Vu que le sol étudié était caillouteux, la caractérisation des éléments grossiers contenus dans les cylindres a été réalisée par les deux méthodes citées précédemment.

Mesure de la conductivité hydraulique

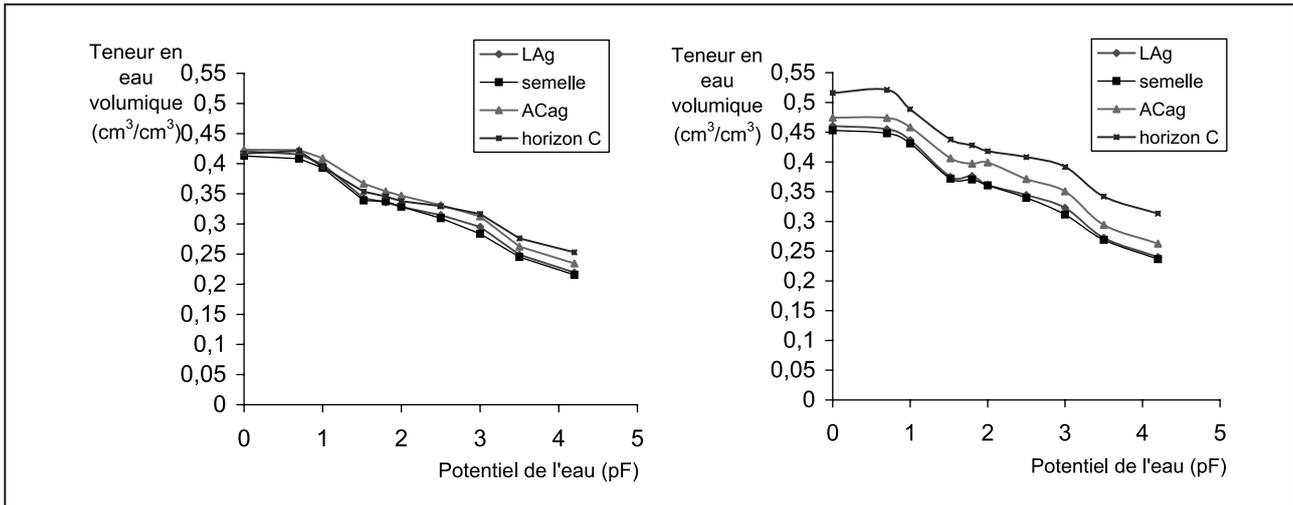
L'infiltromètre à disque a été utilisé pour mesurer la conductivité hydraulique du sol (Perroux et White, 1988). Les deux méthodes multipotentiel (Ankeny *et al.*, 1991) et monopotentiel (Haverkamp *et al.*, 1994) ont été appliquées pour déterminer la conductivité hydraulique (Coquet *et al.*, 2000). La méthode d'Ankeny *et al.* (1991) utilise le flux en régime permanent pour établir la relation conductivité hydraulique-potentiel de l'eau. Elle consiste à faire les mesures à différents potentiels sans déplacer l'infiltromètre. Les essais d'infiltration ont été réalisés aux potentiels d'infiltration suivants: -15, -10, -6, -3, et -1 cm. On travaille par ordre croissant de -15 à -1 cm. La méthode monopotentiel (Haverkamp *et al.*, 1994) utilise le régime transitoire pour estimer la sorptivité et la conductivité hydraulique.

Pour chacune des couches du profil, respectivement à 2, 32, 40 et 80 cm pour LAg, semelle, ACag, et C, on a réalisé:

- 5 essais multipotentiels aux potentiels d'infiltration successifs.
- 1 essai monopotentiel à chacun des potentiels.

Figure 4 - Caractéristiques de rétention en eau moyenne de l'ensemble du profil
(a) échantillons intacts (avec éléments grossiers); (b) terre fine

Figure 4 - Characteristics of average water retention of the each horizon of the profile
(a) undisturbed samples (with coarse elements), (b) calculated for the fine soil.



Mesure de la fraction d'eau mobile

Après l'atteinte du régime permanent lors des essais mono-potentiels, on a utilisé la méthode de Clothier *et al.* (1992) pour évaluer la fraction mobile. Cette méthode consiste à appliquer l'infiltromètre pour atteindre le régime quasi permanent au potentiel fixé et à infiltrer au-delà du temps gravitaire (la vitesse d'infiltration est alors stable et constante au cours du temps) une lame d'eau du réservoir supérieure à 10 mm. A ce moment, on peut considérer que l'ensemble de la porosité fonctionnelle à ce potentiel est remplie d'eau jusqu'à plus d'1 cm de profondeur en dessous de la surface d'infiltration. On substitue alors au 1^{er} infiltromètre un deuxième infiltromètre rempli d'une solution de bromure à la concentration de 489 mg/L. On infiltre au cours de cette deuxième étape environ 10 mm de solution afin de remplir les pores fonctionnels dans la couche sous-jacente à l'infiltromètre. On prélève ensuite sous le disque de l'infiltromètre trois échantillons de sol avec une gouge de 2,5 cm de diamètre. Le prélèvement est effectué sur le 1^{er} centimètre de profondeur sous la surface d'infiltration. Une fois prélevés, les échantillons sont pesés et séchés à l'étuve (105 °C, 48 heures) pour obtenir la teneur en eau pondérale W ($g.g^{-1}$). Le bromure est extrait du sol avec de l'eau distillée en mélangeant 3 g de sol sec avec 15 g d'eau et en les agitant pendant 24 heures. La concentration de bromure en solution de chaque échantillon est ensuite mesurée par HPLC (chromatographie liquide à haute performance). Cette concentration va nous permettre de calculer la fraction d'eau mobile f au potentiel fixé par l'infiltromètre avec l'équation de Clothier *et al.* (1992):

$$\theta_m = \theta (C/C_0) \text{ d'où } f = \theta_m / \theta = C/C_0$$

où C/C_0 est la concentration de bromure relative; C , la concentration de Br^- mesurée dans la solution de l'échantillon de sol; C_0 , la concentration initiale de bromure dans l'infiltromètre; θ_m , la teneur en eau volumique mobile; θ , la teneur en eau volumique totale du sol. Cette fraction mobile est calculée en supposant que la concentration de la phase mobile est celle injectée par l'infiltromètre, que la fraction immobile ne contient pas de Br^- et que le phénomène de dispersion est négligeable (Clothier *et al.*, 1992; Clothier *et al.*, 1995; Angulo-Jaramillo *et al.*, 1996; Snow, 1999; Okom *et al.*, 2000).

Ajustement des propriétés hydrodynamiques avec RETC

Afin de pouvoir utiliser les caractéristiques de rétention en eau et de conductivité hydraulique mesurées expérimentalement dans des modèles de transfert de l'eau et de solutés dans le sol, nous avons décrit ces caractéristiques par des relations mathématiques ajustées à l'aide du code RETC (van Genuchten *et al.*, 1991 ; Annexe 2).

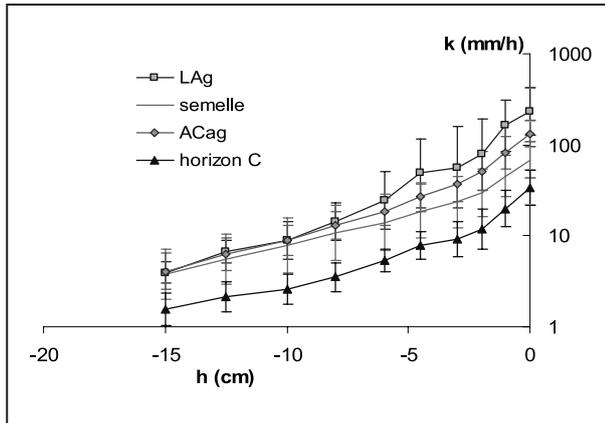
RÉSULTATS

Caractérisation des éléments grossiers

L'abondance massique des éléments grossiers mesurée par tamisage sur horizon varie de 25 % en surface à 29 % en profondeur dans l'horizon A et est de 50 % dans l'horizon C. La

Figure 5 - Conductivités hydrauliques moyennes des différentes couches du profil de sol (méthode multipotential). Les barres d'erreur représentent ± 1 écart-type de la loi de distribution log normale.

Figure 5 - Average hydraulic conductivity for all layers of the profile (multipotential method). Error bars represent the \pm one standard deviation.



moyenne des teneurs volumiques en éléments grossiers des échantillons des presses de Richards varie entre 8,2 % pour l'horizon LAg, 9,0 % dans la semelle, 10,3 % dans l'horizon ACag et 18,5 % dans l'horizon C, avec un écart type respectivement de 3,0 %, 2,1 %, 3,9 % et 7,4 % (tableau 2).

Des tests statistiques non paramétriques (test du signe et test de Wilcoxon) ont montré une différence significative entre la mesure de la masse volumique de solide (2,6 kg/dm³, en moyenne) et celle de la masse volumique apparente au seuil de risque de 5 %, ce qui confirme que les cailloux sont poreux avec une porosité de 2 % et un écart type de 5 %.

Caractéristiques de rétention en eau

Toutes les courbes ont une allure similaire (figure 3). On observe une variabilité assez marquée entre les répétitions pour l'horizon LAg. Ces variations peuvent être expliquées par l'hétérogénéité de cette couche qui est travaillée. La teneur en éléments grossiers des échantillons ne peut expliquer la variabilité des caractéristiques de rétention de cet horizon, car les échantillons 3 et 4, dont les caractéristiques de rétention sont les plus différentes (figure 3), ont des teneurs en éléments grossiers très proches (tableau 2).

L'horizon LAg présente un Coefficient de Variation (CV) de la teneur en eau volumique de 3 % jusqu'à pF 1 et de 11 % à partir de pF 1,5. On observe une variabilité moins importante entre les répétitions pour la semelle de labour (CV entre 1 à 3 %). Ceci est lié vraisemblablement au tassement du sol par les outils de travail du sol qui font disparaître une partie de la macroporosité. On observe un CV de la teneur en eau volumique de 3 à 6 % dans

la couche ACag et 4 à 8 % dans l'horizon C. La teneur en eau est plus élevée dans l'horizon C par rapport aux couches superficielles à partir de pF 2,5 (figure 4), ce qui peut être expliqué par une teneur en argile plus importante dans l'horizon C (tableau 1).

La relation entre la teneur en eau et le potentiel de l'eau présente 2 points d'inflexion pour presque tous les échantillons: une décroissance importante entre les pF 1 et 1,5 et une deuxième entre les pF 3 et 3,5 (figure 3), ce qui identifie respectivement deux volumes importants de pores de rayons équivalents, compris entre 0,15 et 0,047 mm pour l'un et entre 1,5 et 0,47 μ m pour l'autre. Le sol étudié présente donc une porosité bimodale.

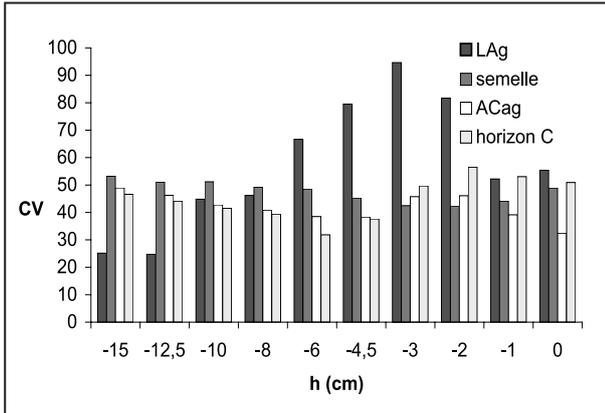
Si l'on estime la réserve utile du sol entre pF 2 et pF 4,2, on obtient approximativement, pour une profondeur d'enracinement de 60 cm, une réserve d'eau utile pour la plante de 66 mm. Cette faible réserve utile peut s'expliquer en partie par l'abondance des éléments grossiers dans les échantillons du sol. On a calculé la caractéristique de rétention en eau de la terre fine par élimination des éléments grossiers de taille supérieure à 2 mm contenus dans les cylindres échantillonnés, en les considérant comme des volumes inertes, pour voir leur effet sur la caractéristique de rétention en eau du sol (figure 4b). On observe une nette différenciation des horizons, sauf pour la semelle de labour dont la caractéristique de rétention reste similaire à celle de l'horizon LAg. L'effet de la teneur en argile est clairement mis en évidence, avec une meilleure rétention de l'eau dans l'horizon le plus riche en argile (horizon C). La réserve utile calculée sur la base de la terre fine seule (i.e. si elle constituait l'ensemble des horizons) est de 77 mm. Mais lorsque l'on prend en compte la teneur en massique en éléments grossiers à l'échelle de l'ensemble de l'horizon, on obtient une réserve utile de 62 mm. Ces calculs supposent que les éléments grossiers ne contribuent pas à la rétention ou alors de manière négligeable, ce qui est cohérent avec leur faible porosité (tableau 2). Toutefois, les teneurs en éléments grossiers des échantillons utilisés pour la rétention sous-estiment largement celles mesurées dans les horizons. Il est donc possible que les éléments grossiers, en particulier ceux de grande taille, aient des caractéristiques porales différentes de celles étudiées à partir des échantillons prélevés pour mesurer la rétention en eau du sol.

Conductivité hydraulique

On observe une variation de conductivité hydraulique en fonction des horizons. La conductivité hydraulique de l'horizon A est plus élevée que celle de l'horizon C (figure 5). On observe que les conductivités hydrauliques moyennes pour l'horizon A (LAg, semelle et ACag) sont quasiment identiques jusqu'au potentiel -8 cm. Ce résultat amène à dire que le labour par la charrue et le compactage du sol par les roues des engins agricoles n'ont pas affecté la porosité du sol de rayon équivalent inférieur à 0,18 mm. Ce potentiel est proche de celui mesuré par Coquet *et al.* (2001) et proche de celui défini par Jarvis et Messing (1995).

Figure 6 - Evolution de coefficient de variation de la conductivité hydraulique en fonction des horizons de sol.

Figure 6 - Evolution of coefficient of variation of the hydraulic conductivity with soil matric potential for each horizon of the soil.

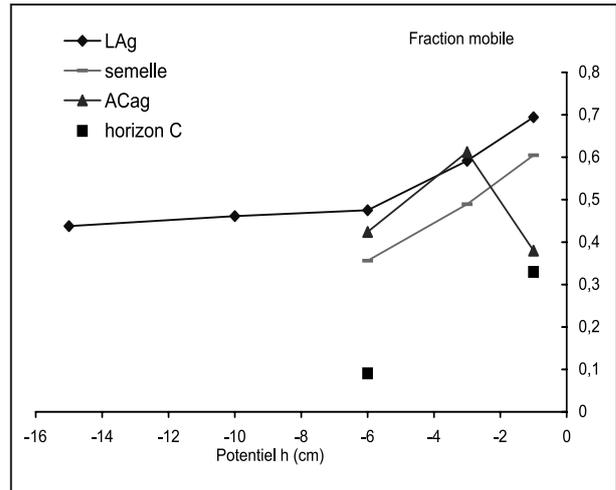


On observe, en revanche, à partir du potentiel -6 cm, des différences de conductivité hydraulique entre les différentes couches de l'horizon A, ce qui conforte l'approche de la compartimentation de cet horizon en deux horizons perturbés (couche de labour LAg et semelle) et une 3^e couche non perturbée par le travail du sol ACag.

On observe que la conductivité hydraulique est plus élevée en surface dans l'horizon LAg à partir du potentiel -6 cm du fait de la fragmentation par le travail du sol, le climat, la faune et les racines qui font évoluer l'espace poral. La conductivité hydraulique augmente considérablement pour la couche de surface LAg entre -6 et 0 cm de 24 à 230 mm/h. Cet accroissement de conductivité hydraulique est dû à la présence de pores de rayon strictement supérieur à 0,25 mm. Cette augmentation entre -6 et 0 cm est variable entre les répétitions. Cette variabilité peut être liée à la localisation de l'infiltromètre par rapport aux hétérogénéités créées par le travail du sol (Reynolds *et al.*, 1995; Coutadeur *et al.*, 2002). On observe une conductivité hydraulique du sol plus faible au niveau de la semelle à partir du potentiel -6 cm par rapport aux horizons LAg et ACag. Cette diminution est due au fait que cette couche a subi un tassement lié aux passages répétés des outils agricoles entraînant la disparition des macropores. La conductivité hydraulique de la semelle augmente entre les potentiels -6 et 0 cm de seulement 14 à 69 mm/h, ce qui suggère qu'il y a peu de macropores fonctionnels de taille supérieure ou égale à 0,25 mm. On observe aussi moins de variations entre les répétitions pour cet horizon. La conductivité hydraulique mesurée pour l'horizon ACag présente des valeurs intermédiaires entre celles de l'horizon LAg et celles de la semelle. La conductivité hydraulique de l'horizon C est faible par rapport aux autres couches superficielles (LAg, semelle et ACag) ce qui peut être lié

Figure 7 - Valeurs de la fraction mobile f en fonction de potentiel.

Figure 7 - Relationship between mobile water fraction and matric potential.



à sa structure massive. Le coefficient de variation des valeurs de conductivité hydraulique varie pour l'ensemble de la gamme de potentiels explorés entre 25 et 95 %, 42 et 53 %, 32 et 49 %, 32 et 56 % respectivement, pour l'horizon LAg, la semelle, l'horizon ACag et l'horizon C (figure 6).

En utilisant la méthode monopotentiel (Haverkamp *et al.*, 1994), on observe que quasiment toutes les valeurs mesurées de la conductivité hydraulique sont comprises entre les valeurs minimum et maximum obtenues par la méthode multipotentiel (voir Annexes 3a et 3b).

Dans l'horizon C, certaines valeurs de conductivité sont cependant plus élevées que celles trouvées par la méthode multipotentiel. Cette incohérence peut être attribuée à l'incertitude du choix du temps à partir duquel on considère que le régime permanent d'infiltration est effectivement atteint, à l'incertitude de la lecture des graduations sur le vase de Mariotte, à l'incertitude réelle sur le rayon de la surface d'infiltration, qui dépend du soin avec lequel on a réparti le sable de contact entre le disque de l'infiltromètre et le sol, et aussi aux erreurs de mesure sur θ (Coquet *et al.*, 2000). Toutefois, la bonne cohérence entre les deux méthodes confirme les résultats obtenus.

Fraction mobile

Les valeurs de la teneur en eau mobile varient entre 0,03 cm³.cm⁻³ pour l'horizon C au potentiel -6 cm à 0,32 cm³.cm⁻³ pour la couche de surface LAg au potentiel -1 cm (annexe 4). Pour l'horizon C, la teneur en eau mobile est très faible de l'ordre de 0,03 cm³.cm⁻³ pour le potentiel -6 cm et à 0,1 cm³.cm⁻³ pour le potentiel -1 cm. Cette couche se caractérise par une teneur

Tableau 4 - valeurs des paramètres estimées pour le modèle de Durner avec RETC.**Table 4** - Values of parameters estimated with the dual-porosity model of Durner using RETC.

	θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	α_1 (cm ⁻¹)	n_1	α_2 (cm ⁻¹)	n_2	ω_2	K_s (cm.j ⁻¹)	R ²	SSQ
LAg	0,182	0,425	0,112	1,62	0,0008	1,51	0,500	568	0,991	0,0013
semelle	0,153	0,409	0,061	1,55	0,0008	1,29	0,500	163	0,995	0,0008
ACag	0,206	0,424	0,080	1,54	0,0007	1,67	0,500	319	0,997	0,0005
C	0,200	0,430	0,096	2,10	0,001	1,36	0,573	59,1	0,908	0,0005

en argile plus importante par rapport aux autres et une teneur en éléments grossiers élevée. Ces facteurs peuvent expliquer la forte diminution de la fraction mobile pour l'horizon C.

Actuellement, nous n'avons pas suffisamment de points de mesures pour estimer de façon fiable l'évolution de la fraction d'eau mobile dans le sol en fonction du potentiel (figure 7). On note toutefois une tendance à l'augmentation de la fraction mobile avec le potentiel de l'eau dans le sol mais cette évolution est perturbée par l'abondance des éléments grossiers. Cette tendance est bien marquée dans la couche de surface LAg et dans la semelle. La fraction d'eau mobile augmente de 44 à 69 % pour LAg. Cette tendance n'est pas observée dans la couche ACag. Cette apparente incohérence est sans doute à mettre en relation avec la position relative de l'infiltromètre et des éléments grossiers qui n'a pas été relevée sur le site de chaque infiltration.

Les faibles valeurs de la fraction d'eau mobile, en particulier dans l'horizon C et pour les potentiels matriciels faibles, montrent que le transport des solutés vers la profondeur peut être plus rapide qu'attendu, compte tenu du fait qu'une partie seulement de la porosité participe au transport convectif dans ce sol. Ce constat va dans le sens d'une plus grande vulnérabilité de la nappe souterraine aux polluants lixiviiés à travers le sol.

Ajustement des propriétés hydrodynamiques

Il apparaît que les modèles de caractéristiques hydrodynamiques à simple porosité ne permettent pas d'obtenir des courbes $\theta(h)$ et $K(h)$ qui ajustent correctement les données de rétention en eau et de conductivité hydraulique en même temps. En revanche, les courbes $\theta(h)$ et $K(h)$ obtenues, dont les propriétés hydrauliques ont été ajustées en utilisant un modèle à double porosité (figure 8), décrivent correctement les données mesurées. On observe aussi que le coefficient de régression R² entre les valeurs calculées et observées est presque égal à 1 dans toutes les couches (tableau 4), ce qui indique une très bonne corrélation entre les valeurs observées et calculées. De même, on a trouvé une valeur de SSQ très faible dans toutes les

couches, ce qui signifie la bonne convergence entre l'estimation du modèle et les mesures.

Les résultats de ces ajustements mettent bien en évidence le système à double porosité observé pour les mesures de rétention. Le paramètre n_1 augmente de 1,5 dans l'horizon non perturbé à 1,6 dans l'horizon de labour. De même, α_1 augmente avec le labour (tableau 4). Cette augmentation est liée à la présence de macropores créés par le travail du sol, la faune et les racines. On observe que le compactage lié aux outils agricoles dans la semelle a un effet négatif sur les propriétés hydrauliques du système poreux. Le paramètre α_1 diminue de 0,08 cm⁻¹ dans la couche non perturbée à 0,06 cm⁻¹. Le paramètre α_2 est presque le même dans tout l'horizon A (LAg, semelle, ACag), ce qui signifie que l'horizon présente la même microporosité. L'horizon C présente un α_2 plus grand qui peut être lié à la teneur en argile plus importante dans cet horizon.

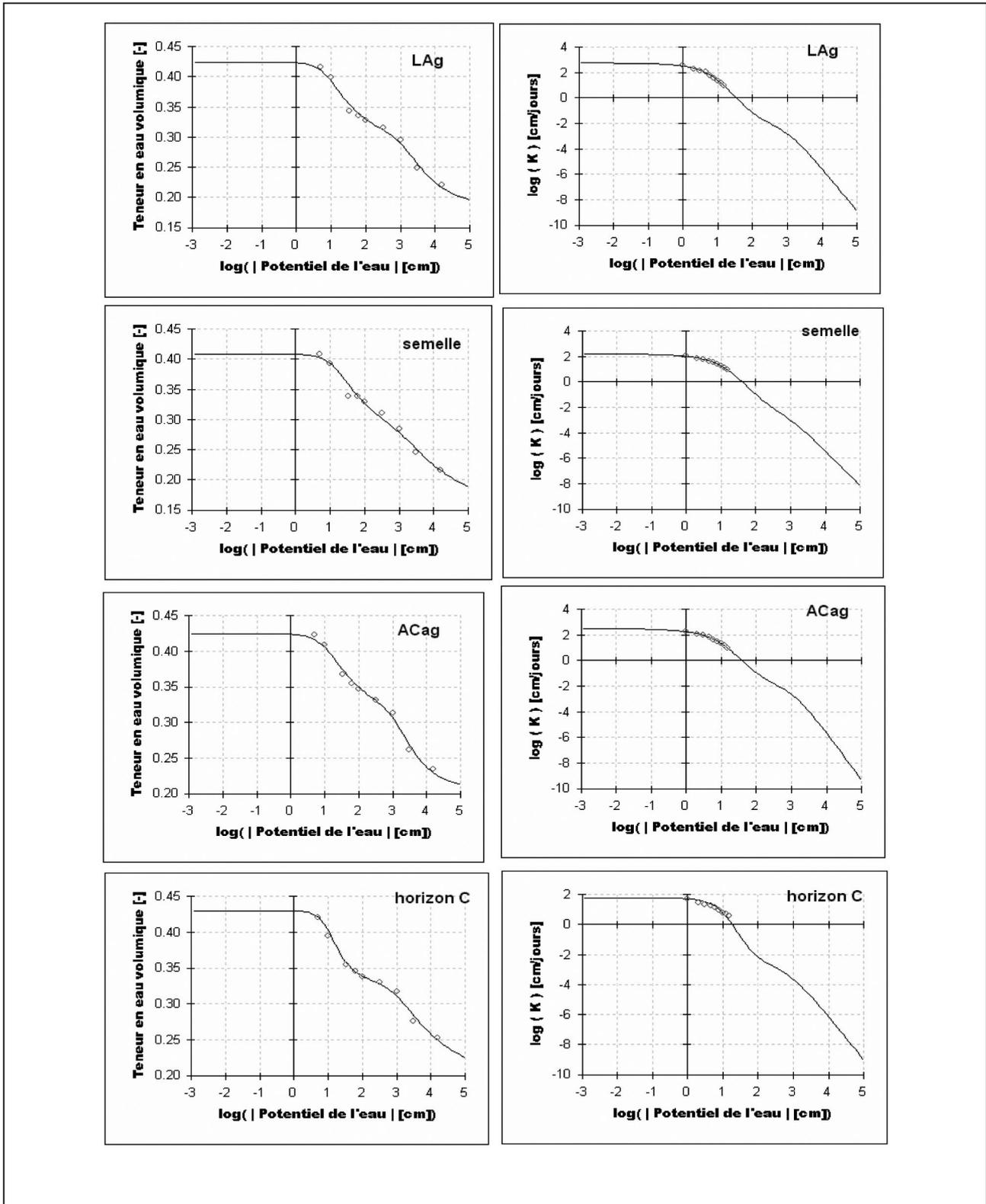
CONCLUSION

Nous avons caractérisé les propriétés hydrodynamiques d'un sol de la plaine de la Bekaa. L'analyse de la courbe caractéristique de rétention en eau du sol $\theta(h)$ mesurée avec la presse de Richards nous a permis d'identifier un système à double porosité. Nos résultats montrent que la caractéristique de rétention en eau est influencée par le labour. On a observé une teneur en eau volumique importante au point de flétrissement de la plante (pF 4,2), de l'ordre de 20 %. La réserve utile de ce sol est très faible, de l'ordre de 60-65 mm d'eau pour 60 cm du sol, malgré une texture argilo-sableuse. Une telle réserve utile justifie le recours à une irrigation nécessitant une gestion fine en termes de doses et de fréquences d'apport. La difficulté que représente une telle gestion peut expliquer la situation actuelle de dégradation de la qualité des eaux souterraines, vraisemblablement liée à des doses d'irrigation excessives.

La conductivité hydraulique en régime insaturé montre une variabilité importante dans la couche labourée. La conductivité

Figure 8 - Ajustement des courbes $\theta(h)$ et $K(h)$ obtenu pour les 4 couches du profil avec le modèle à double porosité.

Figure 8 - Calibration of $\theta(h)$ and $K(h)$ curves for the different layers of the soil profile with the dual-porosity model.



hydraulique à saturation la plus élevée, $6,4 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, a été observée dans la couche labourée LAg. Une conductivité à saturation trois fois plus faible, $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, a été mesurée dans la semelle de labour. On observe la conductivité hydraulique à saturation la plus faible dans l'horizon C, $9,4 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. Ces premiers résultats soulignent bien la différenciation du profil du point de vue de ses propriétés hydrodynamiques. La conductivité hydraulique relativement faible peut expliquer l'engorgement du sol à certaines périodes de l'année, surtout pendant la saison pluvieuse.

La teneur en eau mobile la plus faible, de l'ordre de $0,03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ pour le potentiel -6 cm et à $0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ pour le potentiel -1 cm , a été observée dans l'horizon C, horizon qui se caractérise par une teneur en argile plus importante par rapport aux autres et une teneur en éléments grossiers élevée. Cette faible teneur en eau mobile peut avoir une influence négative sur le transport des solutés en augmentant leur vitesse de transport dans le sol et donc sur les risques de contamination de la nappe, d'où l'importance d'étudier le fonctionnement hydrodynamique réel du profil par une modélisation qui prenne en compte une description précise du profil: les propriétés hydrodynamiques qui caractérisent chaque horizon, les conditions météorologiques rencontrées pendant la période de simulation, l'irrigation pratiquée, ainsi la fluctuation de la nappe seront indispensables à cette modélisation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Isabelle Cousin, de l'UR Science du Sol de l'INRA d'Orléans, pour sa relecture approfondie de l'article.

BIBLIOGRAPHIE

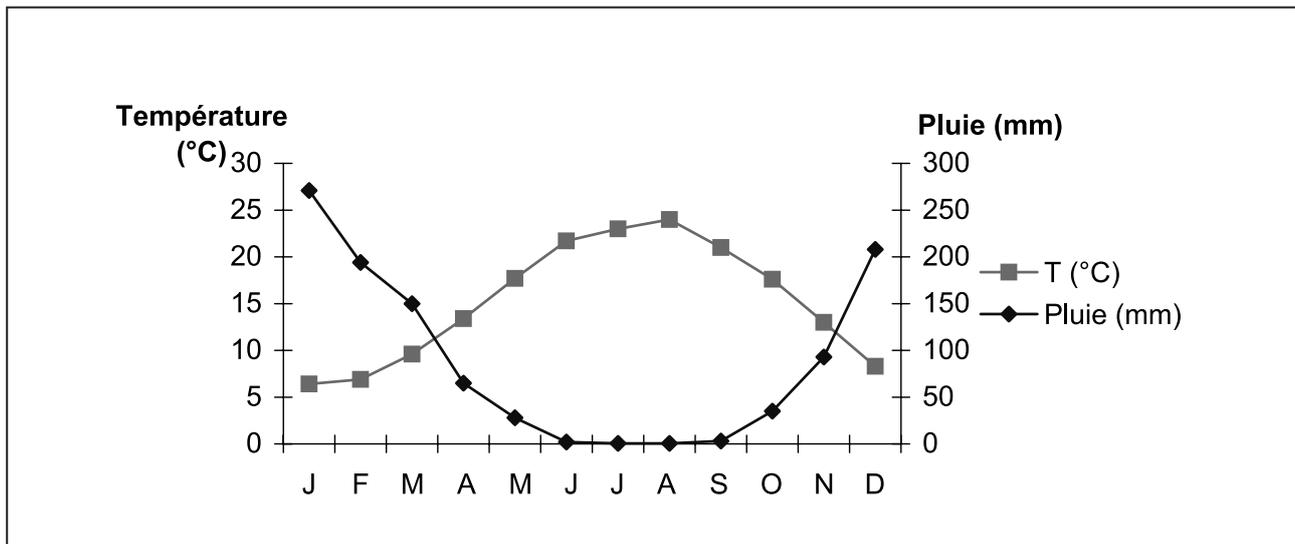
- AFNOR, 1999a - Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (NF ISO 10694). Qualité des sols, volume 1, p 361-372.
- AFNOR, 1999b - Détermination de la teneur en carbonates (NF ISO 10693). Qualité des sols, volume 1, pp. 349-359.
- AFNOR, 1999c. Détermination du pH (NF ISO 10390). Qualité des sols, volume 1, pp. 339-347.
- Angulo-Jaramillo., Gaudet J.P., Thony J.L., Vauclin M., 1996 - Measurement of hydraulic properties and mobile water content of a field soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, pp. 710-715.
- Ankeny M.D., Ahmed M., Kaspar T.C., Horton R., 1991 - Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 55, pp. 467-470
- Atlas climatique du Liban, 1977 - Publié par le service météorologique du Liban. Tome I. République libanaise.
- Atlas du Liban, 2004 - République libanaise. Conseil du développement et de la reconstruction en collaboration avec la direction générale de l'urbanisme.
- Baize D., 1988 - Guide des analyses courantes en pédologie. INRA, Paris. 172 p.
- Baize D. et Girard M.C., 1995 - Référenciel pédologique. Inra Editions. 332 p.
- Clothier BE, Kirham M.B., Mclean J.E., 1992 - *In situ* measurement of the effective transport volume for solute moving through soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 733-736
- Clothier B.E., Heng. L., Magesan G.N., Vogeler I., 1995 - The measured mobile-water content of an unsaturated soil as a function of hydraulic regime, *Aust. J. Soil Res.*, 33, pp. 397-414.
- Coquet Y., Bouchet A., Labat C., Vachier P. et Roger - Estrade J, 2000 - Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disque. Aspects théoriques et pratiques. *Etude et gestion des sols*, 7, pp. 7-24.
- Coquet Y., Roger-estrade J., Boucher A., Labat C. et Vachier P., 2001 - Intérêt d'une compartimentation morphologique du profil cultural pour l'étude de l'infiltration de l'eau dans les couches de sol travaillées. *Etude et gestion des sols*, 8 : pp. 19-31.
- Coutadeur C., Coquet Y., Roger-Estrade J., 2002 - Variation of hydraulic conductivity in a tilled soil. *European Journal of Science*, 53, pp. 619-628.
- Darwich T., Khawlie M., Jomaa I., Awad M., El-Chihny R., 2000 - Water and soil vulnerability to contamination in central Bekaa Plain-Lebanon. Expert group meeting on implications of groundwater rehabilitation for water resources protection and conservation. Escwa, UNEP, BGR and MER. pp. 14-17. Beirut, Lebanon.
- Darwich T., Attalah T., El Khatib M., Hajhasan S., 2002 - Impact of irrigation and fertilisation on NO_3 leaching and soil-ground water contamination in Lebanon. Paper n° 406. Symposium n° 59. 17th WCSS, pp. 14-21 August 2002, Thailand.
- Darwich, T.M., Khawlie, M., Jooma, I., Abou Daher, M., Awad, M., Masri, T., Shaban, A., Faour, G., Bou Kheir, R., Abdallah, C., Haddad, T., 2006 - Soil map of Lebanon 1/50 000. CNRS-Lebanon.
- Digital Globe, 2008 - Image NASA- Google Earth.
- Dubertret, 1955 - Carte géologique du Liban, au 1/200000^e.
- Durner, W.. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, *Water Resour. Res.*, 32(9), pp. 211-223, 1994.
- Ecodit, 2001 - Lebanon state of the environment Report. 283 p.
- El-Fadel, M., Zeinti, M., Jamal, D., 2000 - Water resources in Lebanon: Characterization, water balance and constraints, *Water Resources Development*, 16 (40), pp. 615-638.
- Flint L.E, Flint, A.L 2002 - Particle density. *Methods of soils Analysis. Part 4-Physical methods.* Soil Science Society of America Madison, Wisconsin, USA, pp. 229-240.

- Haverkamp R., Ross P.J., Semettem K.R.J., Parlange J.Y., 1994 - Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resour. Res.*, 30 (11), pp. 2931-2935.
- Jarvis N.J., Messing I., 1995 - Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, pp. 27-34.
- Klute A., 1986 - Water Retention : laboratory methods. *Methods of soils Analysis. Part-1- Physical and mineralogical methods.* Soil Science Society of America Madison, pp. 635-662.
- Korfali S., Davies B., 2004 - The relationships of metals in river sediments (Nahr Ibrahim, Lebanon) and adjacent floodplain soils. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and development.* Manuscript LW 04 010. Vol.VI.
- Litani Basin Management Advisory Services (BAMAS), 2005 - Technical survey report. Litani water quality management project.
- Mualem Y., 1976 - A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, pp. 513-522.
- Musy A., Soutter M., 1991 - *Physique du sol.* Presses Polytechniques et universitaires romandes.
- Okom A. E. A., White R. E., Heng L. K., 2000 - Field measured mobile water fraction for soils of contrasting texture. *Aust. J. Soil Res.*, 38, pp. 1131- 42.
- Perroux K.M., White I., 1988 - Designs for disc permeameters. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 52, pp. 1205- 1215.
- Reynolds W.D., Gregorich E.G., Curnoe W.E., 1995 - Characterisation of water transmission properties in tilled and untilled soils using tension infiltrometers. *Soil Tillage Research* 33, pp. 117-131.
- Sadek A., 2005 - Conditions d'alimentation et âges des eaux souterraines dans la plaine de la Bekaa (Liban), *Etudes hydrogéologique et hydrochimique (Isotopes).* Thèse de doctorat. Université de Paris sud XI. 289 p.
- Shaban A., 2003. *Etude de l'hydrogéologie du Liban occidental: Utilisation de la télédétection.* Thèse de doctorat. Université Bordeaux. 202 p.
- Simunek J., Jarvis N. J., van Genuchten M. Th., Gardnäs A., 2003 - Review and comparaison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of hydrology*, 272, pp. 14-35.
- Snow V. O., 1999 - *In situ* measurement of solute transport coefficients: assumptions and Errors. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, pp. 255-263.
- van Genuchten, M.Th., 1980 - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, pp. 892-898.
- van Genuchten, M. Th., Leij F.J. et Yates S.R., 1991 - The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Technical Report IAG-DW12933934, U.S. Salinity Laboratory, U.S. Department, Agricultural Research Service, Riverside, Californie.

ANNEXES

Annexe 1 : Diagramme ombro-thermique de Khirbet Kanafar (moyennes 1956-1970)

Annex 1: Ombrothermic graph for Khirbet Kanafar (1956-1970 average values).



Annexe 2 : Modèles pour la description des caractéristiques hydrauliques du sol

Annex 2: Models for describing soil hydraulic properties

Les courbes de rétention en eau ont été ajustées par le modèle monomodal de van Genuchten (1980) et par le modèle bimodal de Durner (1994). La conductivité hydraulique a été ajustée par le modèle de Mualem (1976) (Annexe 4).

Le modèle à simple porosité utilise les expressions $\theta(h)$ et $K(h)$ établies par van Genuchten (1980) et Mualem (1976) :

- $\theta(h) = \theta_s$ si $h \geq 0$
- $\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) * ((1 + \alpha h)^n)^{-m}$ si $h < 0$

- $K(\theta) = K_s$ si $h \geq 0$
- $K(\theta) = K_s * Se^{0.5} * [1 - (1 - Se^{1/m})^m]^2$ si $h < 0$

où θ_s est la teneur en eau à saturation, θ_r est la teneur en eau résiduelle, α [L^{-1}] et n , m [-] sont des coefficients de forme affectant la courbe de rétention tels que $m = 1 - 1/n$, K_s est la conductivité hydraulique à saturation, Se est le taux de saturation en eau du sol égal à $(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ [-].

Durner divise le système poral en 2 régions en utilisant les fonctions de van Genuchten-Mualem pour chaque région et en superposant par sommation les fonctions de chaque région.

- $\theta(h) = \theta_s$ si $h \geq 0$
- $\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) * (w_1 * Se_1 + w_2 * Se_2)$ si $h < 0$ avec
- $Se_1 = w_1 * [(1 + \alpha_1 h)^{n_1}]^{-m_1}$
- $Se_2 = w_2 * [(1 + \alpha_2 h)^{n_2}]^{-m_2}$
- $K(\theta) = K_s$ si $h \geq 0$
- $K(\theta) = K_s (w_1 Se_1 + w_2 Se_2)^{0.5} * [w_1 \alpha_1 [1 - (1 - Se_1)^{1/m_1}]^{m_1} + w_2 \alpha_2 [1 - (1 - Se_2)^{1/m_2}]^{m_2}]^2 / (w_1 \alpha_1 + w_2 \alpha_2)^2$ si $h < 0$

où α_1 et α_2 [L^{-1}] et n_1, m_1, n_2, m_2 [-] sont des coefficients de forme de la courbe de rétention tels que n_1 et $n_2 > 1$, $m_1 = 1 - 1/n_1$ et $m_2 = 1 - 1/n_2$. w_1 et w_2 sont des coefficients de pondération dont la somme est égale à 1.

θ_s , θ_r et K_s sont des paramètres physiques alors que α_1 , α_2 , n_1 , n_2 sont des paramètres empiriques affectant la forme des courbes de rétention et de conductivité hydraulique (van Genuchten, 1980 ; Simunek *et al.*, 2003).

Annexe 3 : Valeurs des conductivités hydrauliques mesurées Annex 3: Measured hydraulic conductivity values

Annexe 3a : valeurs de la conductivité hydraulique (mm/h) des essais multipotentiels avec ¹nombre de répétitions, ²moyenne géométrique

Annex 3a: values of hydraulic conductivity (mm/h) of the multipotential measurements with ¹number of replicates, ²geometric mean.

Potentiel (cm)	N ¹	LAg	Semelle	ACag	C
		5	5	5	5
-15	moyenne²	4,0	3,8	4,1	1,6
	minimum	2,8	1,5	2,2	1,0
	maximum	5,3	6,5	8,1	3,0
-12,5	moyenne	6,6	5,5	6,2	2,1
	minimum	4,5	2,0	3,8	1,6
	maximum	8,1	9,7	12	4,0
-10	moyenne	8,8	7,8	8,9	2,6
	minimum	4,8	2,5	6,3	1,7
	maximum	16	14	16	4,6
-8	moyenne	14	11	13	3,5
	minimum	7,7	3,3	9,6	2,3
	maximum	26	18	23	6,2
-6	moyenne	24	14	18	5,4
	minimum	11	4,2	13	4,2
	maximum	58	24	32	8,7
-4,5	moyenne	49	19	27	7,8
	minimum	17	5,8	17	5,9
	maximum	130	31	46	13
-3	moyenne	57	23	37	9,1
	minimum	17	7,4	20	6,0
	maximum	215	35	70	18
-2	moyenne	78	30	52	12
	minimum	27	10	25	6,6
	maximum	240	49	97	26
-1	moyenne	160	45	83	20
	minimum	59	20	46	12
	maximum	300	81	140	42
0	moyenne	230	69	130	34
	minimum	95	36	84	23
	maximum	485	135	200	68

Annexe 3b : valeurs de conductivité hydraulique (mm/h) obtenues par la méthode monopotentiel

Annex 3b: values of hydraulic conductivity (mm/h) obtained with monopotential method.

h (cm)	LAg	semelle	ACag	C
-15	5,3	5,3	7,9	4,4
-10		6,2	17	8,9
-6	19		31	
-3	48	40	32	
-1	141	46	41	

Annexe 4 : Valeurs de la teneur en eau volumique θ , de la teneur en eau volumique mobile θ_m , de la fraction d'eau mobile f et de la densité de flux d'infiltration en régime permanent q , pour les différents potentiels dans les différents horizons.

Annex 4: Values of volumetric water content θ , mobile water content θ_m , mobile fraction f and steady-state infiltration rate q , for various matric potentials and for each horizon.

	h (cm)	θ (cm ³ cm ⁻³)	θ_m (cm ³ cm ⁻³)	f (θ_m/θ)	q (mm/h)
LAg	-15	0,36	0,16	0,44	10,1
	-10	0,39	0,18	0,46	36,8
	-6	0,39	0,19	0,48	58,4
	-3	0,41	0,25	0,59	153
	-1	0,46	0,32	0,69	532
Semelle	-6	0,31	0,11	0,36	20,8
	-3	0,38	0,19	0,49	73,8
	-1	0,37	0,23	0,60	266
ACag	-6	0,41	0,17	0,42	61,0
	-3	0,38	0,23	0,61	86,3
	-1	0,41	0,16	0,38	231
Horizon C	-6	0,37	0,03	0,09	4,63
	-1	0,31	0,10	0,33	81,1