CALCUL DE LA VITESSE DE DARCY PAR L'UTILISATION DES VARIATIONS DE TEMPERATURE

MOHAMED AMINE BECHKIT[1], FERIEL DEGHMOUM[1], ABDELHAKIM BENTELLIS[1] , MOHAMMED DJEDDI[1], NABIL CHABOUR[2] ,
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algeria[1].
Université Constantine 1, Algeria[2].
E - mail : mohamed-amine.bechkit@hotmail.fr, feriel.deghmoum@outlook.fr, bentellishakim@gmail.com, dallidjeddi@gmail.com,, nabilchabour@gmail.com

RESUME
La connaissance de la teneur en eau est indispensable pour la compréhension du fonctionnement de la zone non saturée d'où la recherche de méthodes de mesures légères, fiables et applicables sur une large gamme de périodes. L'existence de capteurs de température à haute sensibilité (1/1000 K) permet l'enregistrement des variations de température sur un profil vertical.
Les amplitudes des variations annuelles de température sont fortes (aux latitudes moyennes) et régulières d'une année à l'autre, cependant les variations diurnes sont d'amplitudes inférieures, mais très irrégulières. On peut superposer à la variation diurne (qui comprend une diurne pure ou bien une diurne et une semi diurne) un terme transitoire s'étalant sur quelques jours. Ce dernier est généré en appliquant à la surface du sol un flux de chaleur qui peut être décomposé en une suite de variations d'Heaviside. Il est aussi possible de superposer à la variation diurne un terme transitoire sur quelques heures, un tel terme peut renforcer les harmoniques d'ordre deux ou faire apparaître des harmoniques d'ordre supérieur.
Le traitement des mesures de température, enregistrées aux différentes profondeurs, en résolvant l'équation de la chaleur, avec transferts par conduction et par convection, permet de déterminer à la fois la vitesse de Darcy et la teneur en eau.
Mots-clefs: Vitesse de Darcy - Conductivité thermique - Diffusivité thermique - Teneur en eau.

INTRODUCTION

La zone non saturée est un milieu complexe qui joue un rôle majeur dans les stockages et les transferts d'eau. La détermination de la teneur en eau et de son évolution dans le temps comme celle des transferts verticaux, ont donc fait et font toujours l'objet de nombreuses études et des méthodes variées ont été développées pour mettre au point des mesures quantitatives de ces phénomènes.

Depuis la fin des années trente des études ont été réalisées pour établir les relations entre les propriétés thermiques (conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité calorifique) et la teneur volumique en chacun des constituants d'un sol, elles ont abouti à la définition de formules empiriques (de Vries 1963) simples. Plus tard, les solutions analytiques complètes au problème du transfert conductif et convectif pour des variations temporelles sinusoïdales et transitoires ont finalement été proposées par Tabbagh et al. (1999). Elles ont été appliquées aux variations annuelles (Cheviron 2004 ; Cheviron et al. 2005) et aux variations transitoires (Bendjoudi et al. 2005) ce qui a permis de montrer que, malgré le manque de précision (0,1 K) des capteurs utilisés à l'infiltration ou l'exfiltration sur des durées qui pouvaient être longues, il était possible de déterminer vitesse de Darcy.

MATERIELS ET METHODES

Pour parvenir à exploiter des variations de température d'un profil vertical, sur de courtes durées, deux limitations doivent être levées : (1) les capteurs du commerce ont une sensibilité insuffisante, 0,1 K, (2) il faut disposer de données acquises avec un pas de temps suffisamment court.

La réalisation par l'UMR Sisyphe de capteurs de température (thermomètres à résistance de platine) sensible à 1 mK et d'un système autonome ouvre la possibilité de pallier les limitations antérieures.

On présente sur la figure 1 un exemple des courbes de température enregistrée.

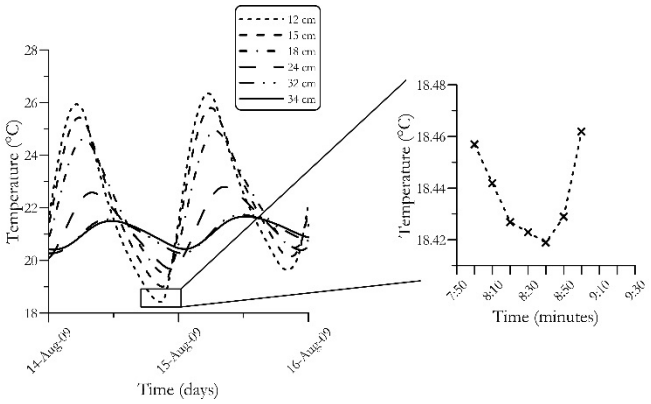

Figure 1. Mesures des températures obtenues aux différentes profondeurs.

Ces valeurs sont tracés en continues (Fig 1) afin de bien mettre en évidence la décroissance de l'amplitude des variations de température avec la profondeur ainsi que la croissance du déphasage avec la profondeur.

On peut superposer la variation diurne (qui comprend une diurne pure ou bien une diurne et une semi diurne) à un terme transitoire s'étalant sur quelques jours (Fig 2). Ce dernier est généré en appliquant à la surface du sol un flux de chaleur qui peut être décomposé en une suite de variations d'Heaviside.

La température résultant de cet apport transitoire a pour expression :

$$T(z,t) = \int_0^t \frac{\partial \phi}{\partial \tau} T_H(z, t-\tau) d\tau \qquad \text{(IV.8)}$$

avec : $T_H(z,t)$ la réponse à une variation en échelon d'Heaviside, dont l'amplitude est $\frac{\partial \phi}{\partial \tau}$, ϕ étant le flux imposé en surface et τ la durée des échelons de flux de surface.

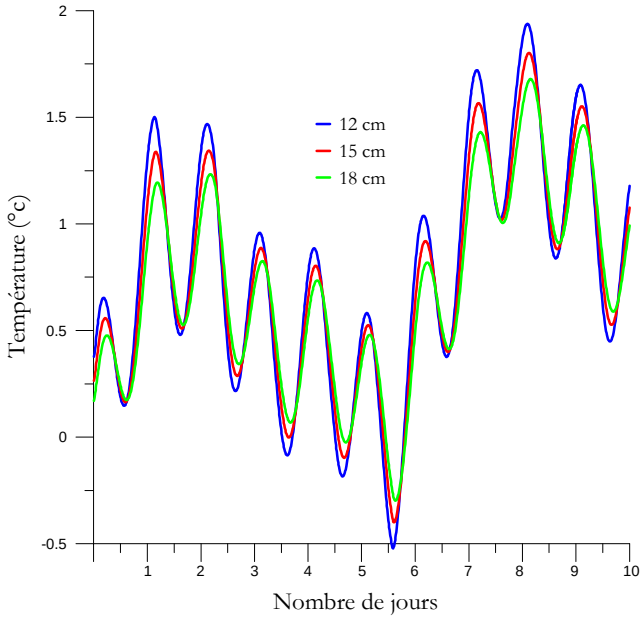

Figure 2. Données synthétiques générées sur 10 jours

Il est aussi possible de superposer à la variation diurne un terme transitoire sur quelques heures, un tel terme peut renforcer les harmoniques d'ordre 2 ou faire apparaître des harmoniques d'ordre supérieur.

Le traitement des mesures de température, enregistrées aux différentes profondeurs, est réalisé en résolvant l'équation de la chaleur par la méthode des différences finies (DF) ou des éléments finis (EF) (Bechkit 2011 ; Bechkit et al. 2013). Avec transferts par conduction et par convection et en utilisant la méthode des moindres carrés, l'intervalle de temps sur lequel porte l'analyse par moindres carrés englobant une série de plusieurs pas de mesures.

RESULTATS

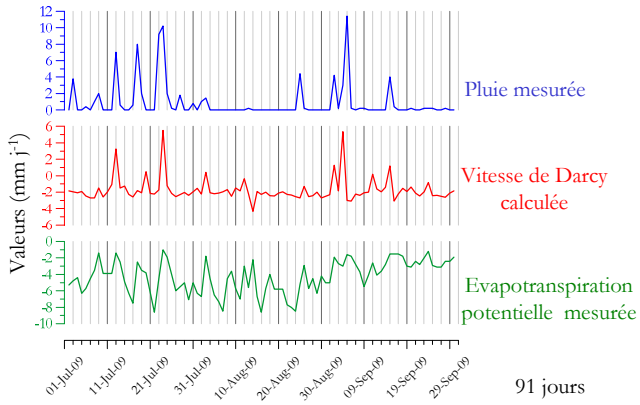

Figure 3. Calcul (DF) de la vitesse de Darcy : faible précipitation - forte variation de T

La figures 3 présente la pluie (en bleu), la vitesse de Darcy (en rouge) et l'évapotranspiration potentielle (en vert) exprimée en mm j^{-1} en adoptant une chaleur volumique de 2.6 J K^{-1} m^{-3}

Pour cet épisode (estival), l'exfiltration est plutôt dominante avec une moyenne de l'ordre de -1,7 mm j^{-1}. Les fortes valeurs d'exfiltration calculées lors de cet épisode sont cohérentes avec les fortes valeurs d'évapotranspiration.

Si aux variations diurnes et semi-diurnes est superposée une variation transitoire lente portant sur quelques jours (Fig 4), les résultats obtenus deviennent dispersés et on n'obtient plus les valeurs correctes de la vitesse de Darcy.

L'explication de ce défaut n'est pas un manque de précision (on travaille en double précision) mais a pour origine le fait que les variations transitoires modulent la composante diurne (ou semi-diurne) d'une façon qui ne peut pas être identique aux différentes profondeurs puisque les transitoires, plus lentes, pénètrent plus profondément (autrement dit, la modulation n'étant pas exactement la même aux différentes profondeurs il faudrait un nombre élevé de période pour bien l'éliminer).

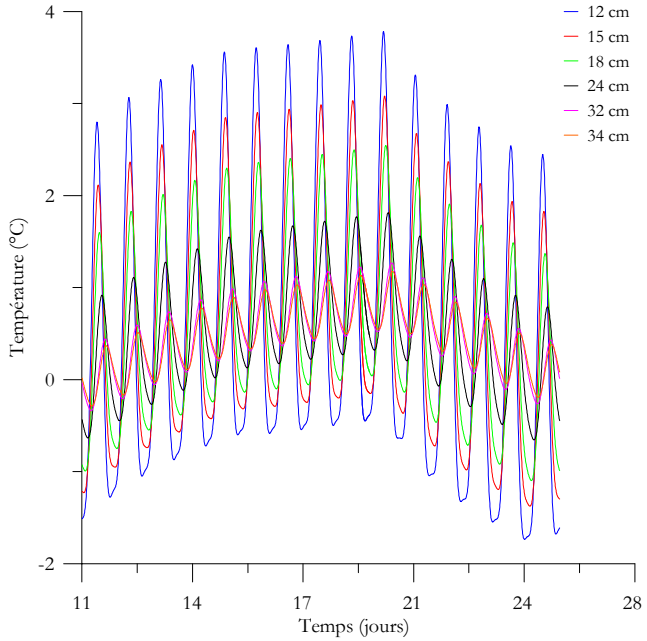

Figure 4. Variation transitoire sur quelques jours venant se superposer aux variations diurne et semi-diurne

Pour corriger ce défaut, on propose de profiter du fait que l'on dispose d'une part de la variation semi-diurne et pas seulement de la diurne, et d'autre part de plusieurs paires de profondeurs. On peut alors considérer que les meilleurs résultats (ou les moins mauvais) sont ceux de la paire de profondeur qui donne simultanément les diffusivités apparentes et les vitesses de Darcy les plus proches à partir de la variation diurne et à partir de la variation semi-diurne. Les tests réalisés avec ce critère sur les données synthétiques montrent que la vitesse obtenue est correcte à mieux que 10%. On disposerait donc avec ce critère d'une méthode qui, sans être parfaite, permet une détermination de la vitesse de Darcy au pas journalier ou avec un petit nombre de jours, mais il reste à évaluer les difficultés introduites par la non-homogénéité du terrain.

CONCLUSION

Après une simple estimation, les approches numériques se sont révélées capables de déterminer la vitesse de Darcy et ses variations à moyen et court terme à partir des enregistrements de la température. De cette expérience réalisée le site de Boissy-le-Châtel on peut conclure que le résultat est satisfaisant et peut être comparé aux autres méthodes utilisées en routine. La mesure de la vitesse de Darcy est la plus difficile, et mérite que la recherche continue pour alléger le processus de calcul.

REFERENCES

Bechkit, M. A., S. Flageul, R. Guérin and A. Tabbagh. 2013. Methods Note/Monitoring soil water content by vertical temperature variations. Groundwater, DOI: 10.1111/gwat.12090.

Bechkit, M. A. 2011. Sur la détermination de la teneur en eau et de l'infiltration à partir de mesures passives de la température du sol. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6 : 162 p.

Bendjoudi, H., B. Cheviron, R. Guérin and A. Tabbagh (2005). "Determination of upward/downward groudwater fluxes using transient variations of soil profile temperature : test of the method with Voyons (Aube, France) experimental data." Hydological Processes 19(18) : 3735-3745.

Cheviron, B. (2004). "Détermination des mouvements d'eau à partir du suivi de la température du sol sur un profil vertical." Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, 234 p.

Cheviron, B. (2005). "Détermination des mouvements d'eau à partir du suivi de la température du sol sur un profil vertical" Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6 : 234 p.

de Vries, D. A. (1963). "Thermal properties of soils" Physics of Plant Environment edited by W. R. van Wijk (Amsterdam: North-Holland): 210-235.

Tabbagh, A., H. Bendjoudi and Y. Benderitter (1999). "Determination of recharge in unsaturated soils using temperature monitoring" Water Resources Research 35 : 2439-2446.