

Utilisation de HYDRUS-1D pour une simulation des transferts couplés d'eau et de chaleur dans un sol non saturé en milieu semi-aride

Bouréma Souleymane TRAORE^{1*}, Marcel Bawindsom KEBRE², François OUEDRAOGO²,
Souleymane SANOGO¹, François ZOUGMORE² et Abdramane BA¹

¹ LOSSA, Laboratoire d'Optique de Spectroscopie et des Sciences de l'Atmosphère, USTTB, FST, Bamako, Mali

² Laboratoire de Matériaux et Environnement (LAME), Unité de Formation et de Recherches en Sciences Exactes et Appliquées, Université de Ouagadougou, 03 BP 7021 Ouaga 03, Burkina Faso

* Correspondance, courriel : tboura@lossa-mali-edu.org

Résumé

Dans cette étude, la dynamique de l'eau (liquide et vapeur) couplée avec la chaleur en milieu non-saturé est simulée en utilisant le code HYDRUS-1D pour un sol sableux d'une zone semi-aride du Burkina Faso. Un profil de sol assimilable à une colonne de sol sans végétation de profondeur 0,3 m est considéré dans ce travail. Cette étude a permis de prédire la variation temporelle et verticale de la teneur en eau volumique et de la température du sol. Une comparaison entre l'évolution de la température prédite et mesurée à la surface du sol ainsi que l'évolution de l'humidité et les taux de précipitations a permis de mettre en exergue la robustesse du code de simulation HYDRUS-1D dans l'établissement d'un bilan hydrique et énergétique d'un sol en milieu semi-aride. Les températures simulées sont en bon accord avec les valeurs mesurées. Les résultats obtenus sont des premières approches qui vont nous permettre d'avancer pour une optimisation de la gestion de l'eau dans un milieu aride en associant des techniques culturales telles les demi-lunes, les zaï et l'amendement en matière organique.

Mots-clés : *HYDRUS, sol non-saturé, teneur en eau, température, évolution temporelle, évolution verticale.*

Abstract

Use of HYDRUS-1D to simulate coupled water and heat transfers in unsaturated soil from semi arid zone

In this study, water (liquid and vapor) coupled with heat flows in unsaturated environment is simulated using the HYDRUS-1D code for sandy soil of a semi-arid zone of Burkina Faso. A soil profile without vegetation assimilable to a soil column for 0.3 m depth is considered. Temporal and vertical variations of volumetric water content and soil temperature have been predicted. A comparison between predicted and measured temperatures; top surface humidity and rainfall allowed to highlight the robustness of HYDRUS-1D code in the establishment of a water and energy balance of an semi-arid soil. The simulated temperatures are in good agreement with measured values. The results are the first approaches that will allow us to move forward to optimize the management of water in an arid environment by combining farming techniques such as half-moons ("*demi-lune*"), "*Zaï*" and the amendment of organic matter.

Keywords : *HYDRUS, unsaturated soil, water content, temperature, temporal evolution, vertical, evolution.*

1. Introduction

Le Burkina Faso est un pays essentiellement agropastoral. L'activité agricole occupe plus de 80 % de la population active [1]. Ce pays, comme les autres pays sahéliens, vit dans une insécurité alimentaire où les potentialités agricoles dépendent tout d'abord des caractéristiques des principales composantes du milieu naturel telles que le climat, le relief, le sol et les ressources en eau. Les pluies, irrégulières et violentes surviennent principalement pendant l'hivernage qui n'a qu'une durée de deux à trois mois. Il s'en suit une longue période sèche où les conditions d'aridité et de stress hydrique, imposent ainsi un certain nombre de limitations au niveau de la production agricole. Les problèmes de gestion de l'eau prennent alors une importance croissante. Ainsi la maîtrise de l'eau a toujours été et restera constamment au centre des préoccupations des responsables du développement agricole en région aride en raison de l'irrégularité de la pluviométrie [2]. L'eau dans le sol ne représente qu'une infime partie de l'eau douce (0,1 %). A l'instar de la vapeur d'eau, elle-même fraction infime dans l'atmosphère et néanmoins fondamentale pour le cycle de l'eau, elle est indispensable pour la continuité du cycle ; à la fois par l'intermédiaire de l'évapotranspiration (plantes et surface des sols) et en entretenant l'approvisionnement des nappes phréatiques et des aquifères. Toute l'eau dans le sol n'est pas pareillement ou totalement disponible pour les plantes ou pour les aquifères. En effet, l'eau entretient avec les différents matériaux composant des sols, des relations particulières qui la rendent plus ou moins durablement indisponible. D'une part, les agriculteurs deviennent de plus en plus exigeants vis-à-vis des facteurs limitatifs du rendement des cultures. D'autre part, des phénomènes assez graves comme l'érosion hydrique, apparaissent sur les sols cultivés, qui au-delà de la perte de sol peut causer des dégâts non négligeables à l'intérieur des exploitations agricoles [3]. Il apparaît alors nécessaire d'entreprendre des études de modélisation des transferts d'eau dans le sol afin de mieux optimiser les pratiques agricoles pour une production soutenue et l'atteinte de l'autosuffisance alimentaire dans les régions arides et semi-arides.

En effet, la modélisation et la simulation numérique des transferts d'eau dans le sol, surtout dans les régions arides et semi-arides est une des préoccupations des chercheurs dans ces dernières décennies. Des études portant sur les transferts d'eau à l'interface sol-atmosphère dans le cas d'un sol du Burkina Faso à faible teneur en eau [1, 4]. Ces travaux ont permis de mettre en évidence le non-équilibre thermodynamique local des transferts couplés eau liquide et vapeur à la couche superficielle du sol. Ce phénomène se traduit par un retard dans le processus de vaporisation de l'eau du sol, c'est à dire le changement de phase liquide vapeur. Ce concept joue un rôle prédominant dans la physique des transferts d'eau dans un sol aride à faible teneur en eau. Un modèle numérique en 1D a été validé par une expérimentation en colonne de sol sous une atmosphère régulée (température et humidité relative fixe). Cependant, le cadre de d'étude ne permet pas de rendre compte de l'influence de la variabilité des paramètres météorologiques (précipitations, température, humidité relative, vitesse du vent par exemple) sur les mécanismes de transport d'eau et l'évolution surtout des profils de teneur en eau dans le sol. Dans la présente investigation, nous utilisons le logiciel HYDRUS-1D [5] pour simuler les transferts couplés d'eau liquide, eau vapeur et de chaleur dans le sol. Une période d'activité agropastorale allant de juin à novembre est considérée pour prédire l'évolution de la teneur en eau volumique et de la température dans la couche superficielle d'un sol de Nasso (Bobo — Dioulasso) avec une prise en compte des paramètres de forçage atmosphérique: température de l'air, la hauteur des précipitations, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent. Nous présentons les résultats pour deux mois de l'année 2009, juin (début de la saison hivernale) et août (période intense de précipitations).

2. Matériel et méthodes

2-1 Sol étudié

Le sol choisi pour notre étude provient de Nasso dans la zone de Bobo-Dioulasso aux coordonnées GPS : 11°10'N - 4°19'O - 460 m. C'est une zone qui se trouve dans la région des Hauts Bassins au Sud-Ouest du Burkina Faso où le climat est de type soudano sahélienne avec des précipitations allant de 900 mm à 1000 mm. La température moyenne annuelle oscille autour de 30°C. Les valeurs des paramètres de forçage pour ce site ont été reçues de la Direction Générale de la Météorologie Nationale. Les propriétés physique, morphologique et hydrodynamique de ce sol sont issues des travaux publiés dans [6, 7] où le lecteur est invité à parcourir pour plus d'informations. Nous retenons pour la présente étude la première couche de sol d'une profondeur de 30 cm (profondeur utile pour les cultures vivrières dans la zone d'étude). Il s'agit d'un sol sableux très pauvre en limon et argile. Ce type de sol reflète les caractéristiques morphologiques des différents types de sol dans les zones arides et semi-arides du Burkina Faso. Le **Tableau 1** résume les caractéristiques physiques du sol en étude : la densité sèche du sol ρ_s (kg.m⁻³), l'indice des vides e (-), la teneur en eau volumique à saturation θ_s (m³.m⁻³) et la perméabilité à saturation K_{sat} (m.s⁻¹).

Tableau 1 : Propriétés physiques du sol

Paramètres	Valeurs
ρ_s	1688
e	0,56
θ_s	0,36
K_{sat}	$3,69 \times 10^{-5}$

2-2. Code de Simulation : HYDRUS-1D

Pour la simulation numérique, nous avons utilisé le logiciel HYDRUS-1D, version 4.14. La gamme de logiciels HYDRUS a pour base, la résolution des équations générales des transferts en les discrétisant sur un maillage représentant le sol étudié. Ce maillage est adapté à des géométries complexes et à la technique de résolution de l'équation de Richards sous sa forme multidirectionnelle par la méthode des éléments finis de [5]. HYDRUS propose un ensemble de processus principaux pouvant être combinés entre autres les transferts d'eau, solutés et de chaleur avec la prise en compte des prélèvements racinaires d'eau pour un sol saturé ou non. HYDRUS permet aussi l'optimisation des paramètres de caractérisation d'un sol par approche inverse. Plusieurs modèles des propriétés hydrodynamiques et hydrothermiques pour un transfert couplé d'eau et de chaleur dans un sol saturé ou non sont disponibles dans ce code de simulation.

2-3. Courbe de rétention d'eau et conductivités hydrauliques

Les modèles le plus utilisés en sciences des sols : le modèle de van Genuchten (1980) pour la courbe de rétention d'eau (**Equation 1**) et le modèle de van Genuchten - Mualem (1976) pour la fonction conductivité hydraulique non-saturée (**Equation 2**) sont utilisés.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \tag{1}$$

$$K_{Lh}(S_e) = K_{sat} S_e^L \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^n \right]^2 \quad (2)$$

Dans ces Equations :

- S_e (-) est le degré de saturation, fonction de la pression négative de l'eau h (m) ;
- θ_{sat} ($m^3.m^{-3}$) et θ_r ($m^3.m^{-3}$) désignent respectivement la teneur en eau volumique de saturation et la teneur en eau volumique résiduelle ;
- m [-], n [-] sont des paramètres de forme, n (> 1) est relatif au taux de désaturation et m ($0 < m < 1$) à la courbure aux potentiels de l'eau proche de l'état quasi-sec ;
- α [m^{-1}] est relatif à l'inverse de la pression de l'eau au point d'inflexion de la courbe, proche de la saturation ;
- Le paramètre L est appelé paramètre de tortuosité. Mualem (1976) suggère la valeur $L = 0,5$

La **Figure 1** représente la courbe de rétention d'eau expérimentale (point) et modélisée (trait plein) à partir de l'**Equation (1)** et extraite de [7]. Les paramètres des deux modèles utilisés avec le code HYDRUS sont consignés dans le **Tableau 2**.

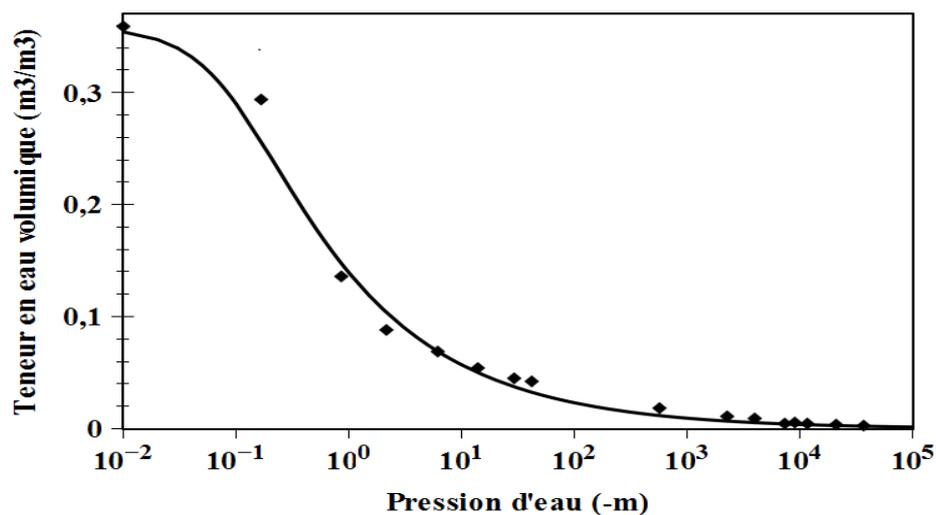


Figure 1 : Courbes de rétention d'eau expérimentale (point) et modélisée (trait plein)

Tableau 2 : Valeurs des paramètres hydrodynamiques du sol (équations 1 et 2)

Coefficients	θ_r ($m^3.m^{-3}$)	θ_s ($m^3.m^{-3}$)	α (m^{-1})	n (-)	m (-)	L (-)	K_{sat} ($m.j^{-1}$)
Valeurs	0	0,3585	10,78	1,39	1-1/n	0,5	3,19

La prise en compte de la température dans la simulation du mouvement de l'eau dans le sol passe par l'introduction d'un facteur multiplicatif $\zeta(h,T)$ dans l'**Equation (2)**, d'où une nouvelle expression de la conductivité hydraulique donnée par l'**Equation (3)**.

$$K_{LT}(h) = K_{Lh}\zeta(h, T) \tag{3}$$

$$\zeta(h, T) = hG_{wT} \frac{1}{\gamma_o} \frac{d\gamma}{dT} \tag{4}$$

Dans cette **Equation (4)**:

- G_{wT} (-) est un facteur gain qui permet de prendre en compte l'influence d'un gradient de de température sur la courbe de rétention d'eau. La valeur considérée pour notre étude est celle proposée dans [8] pour un sol sableux.
- γ ($J. m^2$ ou $kg. s^2$) est la tension superficielle de l'eau du sol en fonction de la température et donnée par l'**Equation (5)**. γ_o est sa valeur de la tension de superficielle pour la température de référence de 25°C.

$$\gamma = 75,6 - 0,1425T - 2,38.10^{-4}T^2 \tag{5}$$

Les modèles utilisés pour la conductivité de la phase vapeur de l'eau ainsi que le transport de la chaleur sont les modèles classiques largement utilisés pour la simulation des transferts couplés d'eau et de chaleur [5]. Pour notre sol sableux, le modèle retenu pour la tortuosité du milieu poreux entrant dans l'expression de la conductivité thermique est donnée par l'**Equation** de [9] :

$$\lambda_o(\theta) = b_1 + b_2\theta + b_3\theta^{0.5} \tag{6}$$

Les valeurs des paramètres de régression b_1 , b_2 et b_3 ($W.m^{-1}.K^{-1}$) sont consignés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Valeurs des paramètres de régression (Equation (6))

Coefficients	b_1	b_2	b_3
Valeurs	$1,47.10^{14}$	$-1,55.10^{15}$	$3,16.10^{15}$

2-4. Configuration, conditions initiales et aux limites

Le profil du sol considéré pour notre étude est assimilable à une colonne de 0,30 m de profondeur. Trois points d'observations localisés aux profondeurs 0,00 m (surface du sol, interface en contact avec l'atmosphère), 0,15 m (milieu du profil) et 0,30 m (interface inférieure) sont considérés pour suivre l'évolution temporelle de la température et de la teneur en eau volumique. Le sol est considéré comme un milieu homogène et isotrope. La construction du maillage comprend 251 nœuds réguliers. La période de calcul va du 01 juin au 30 novembre pour l'année 2009. Des données journalières sont considérées dans le calcul. La teneur en eau initiale est fixée à $0,02 m^3.m^{-3}$ pour la date du 01 juin 2009. Pour assurer la continuité de la teneur en eau, la valeur initiale de la date suivante est la valeur calculée au jour précédent. Il est en de même que la température. La valeur initiale au 01 juin 2009 pour la température est la valeur mesurée. La **Figure 2** résume les conditions aux limites du profil du sol considéré. La surface du sol est soumise aux conditions de variabilité de la température, des précipitations, de l'humidité relative et de la vitesse du vent.

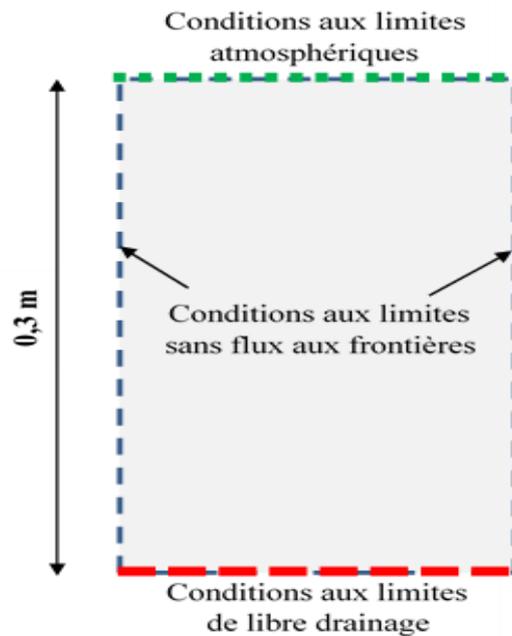


Figure 2 : Configuration et conditions aux limites du profil de sol

3. Résultats et discussion

3-1. Teneur en eau volumique aux points d'observations

Les *Figures 3 et 4* présentent les évolutions de la teneur en eau volumique pour les différents points d'observations dans la colonne de sol. Nous avons extraits des calculs les résultats des mois de juin (démarrage de la saison pluvieuse) et d'août (période intense de précipitations).

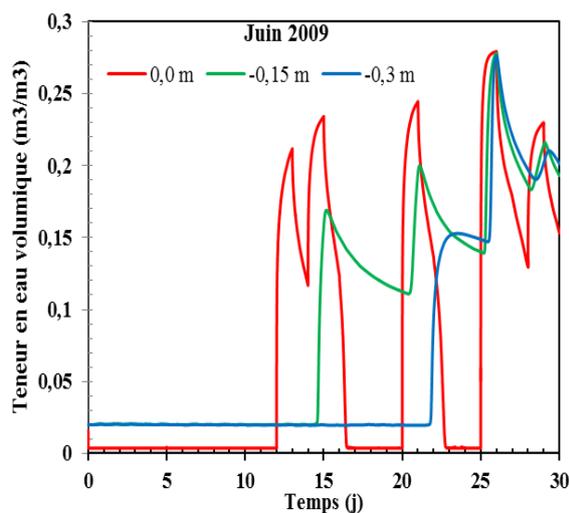


Figure 3 : Evolution de la teneur en eau pour le mois de juin 2009 aux points d'observation

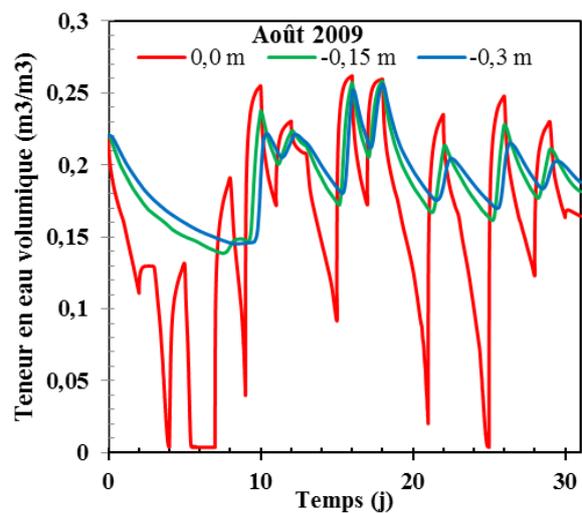


Figure 4 : Evolution de la teneur en eau pour le mois d'août 2009 aux points d'observation

D'une manière générale, la teneur en eau volumique augmente avec la profondeur. Des pics de teneurs en eau sont observés pour tous les nœuds d'observations avec une densité importante pour le mois d'août. En effet, ce mois est marqué par une régularité des pluies avec des quantités plus ou moins importantes. Dans les **Figures 5** et **6**, sont représentées la teneur à la surface du sol et la hauteur des précipitations mesurée pour les mois de juin et août 2009. Ces **Figures** mettent en évidence la cohérence entre l'évolution de la teneur en eau (pics observés) et les facteurs météorologiques directement responsable de cette évolution. Un événement pluvieux précède un pic de teneur en eau. La finesse du pic explique par la texture sableuse du sol caractérisée par un taux d'infiltration importante d'eau. De plus, les températures élevées observées conduisent à une brusque augmentation taux d'évaporation, ce qui va entraîner une chute brutale de la teneur en eau superficielle.

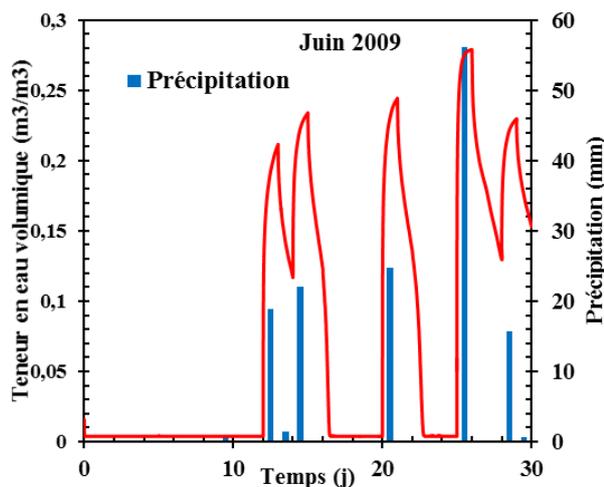


Figure 5 : Teneur en eau à la surface du sol et hauteur de précipitation, juin 2009

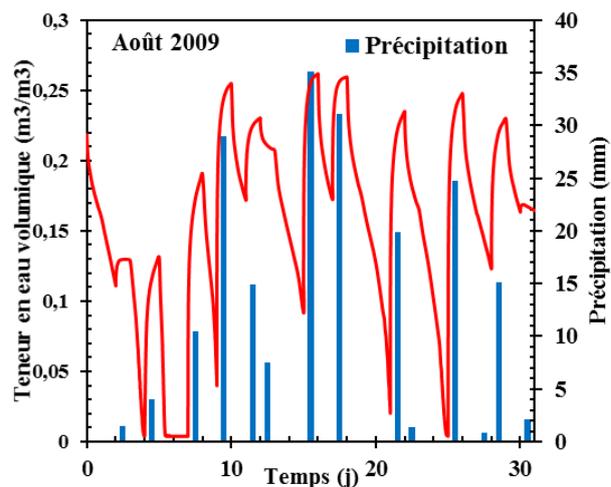


Figure 6 : Teneur en eau à la surface du sol et hauteur de précipitation, août 2009

3-2. Variabilité temporelle de la température

3-2-1. Température aux points d'observations

Les **Figures 7** et **8** présentent l'évolution des températures moyennes journalières respectivement pour les mois de juin et août 2009 et pour les points d'observations sus cités. Les valeurs oscillent autour de la moyenne mensuelle de saison (30°C). La forte variabilité observée à la surface du sol (0,0 m) est liée aux flux d'énergies surfaciques importants générés par les interactions à l'interface sol-atmosphère [9, 10].

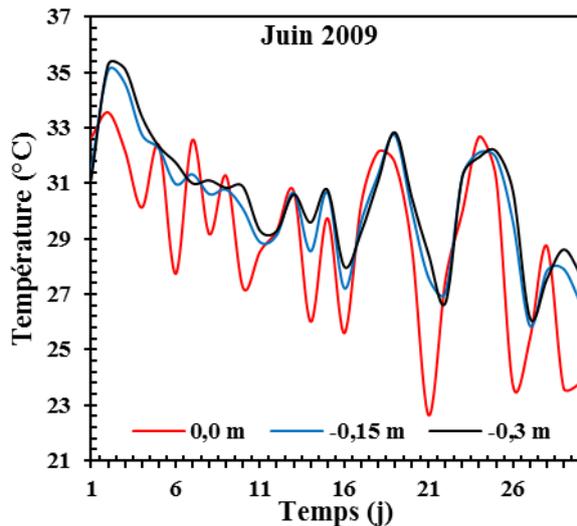


Figure 7 : Evolution de la température, juin 2009

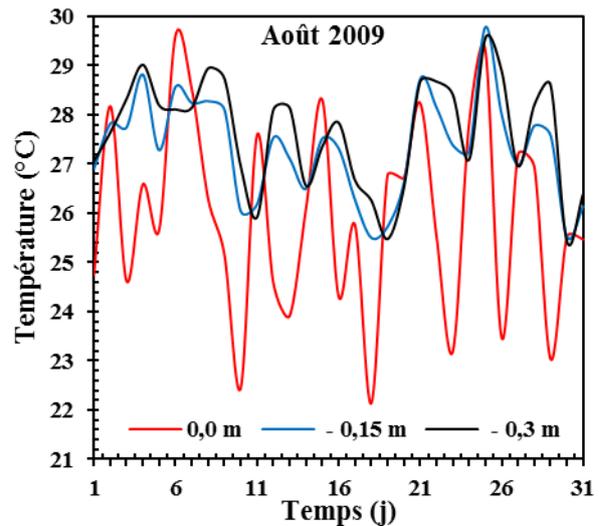


Figure 8 : Evolution de la température, août 2009

3-2-2. Profil de température dans la colonne

Les *Figures 9* et *10* ci-dessous présentent la variation de la température le long du profil en colonne profonde de 0,3 m. Nous choisissons de représenter les profils pour deux dates : avant et après une précipitation.

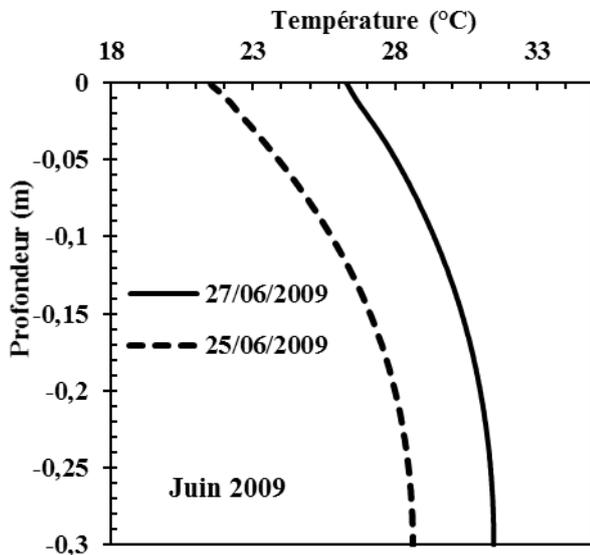


Figure 9 : Profil de température pour deux dates, juin 2009

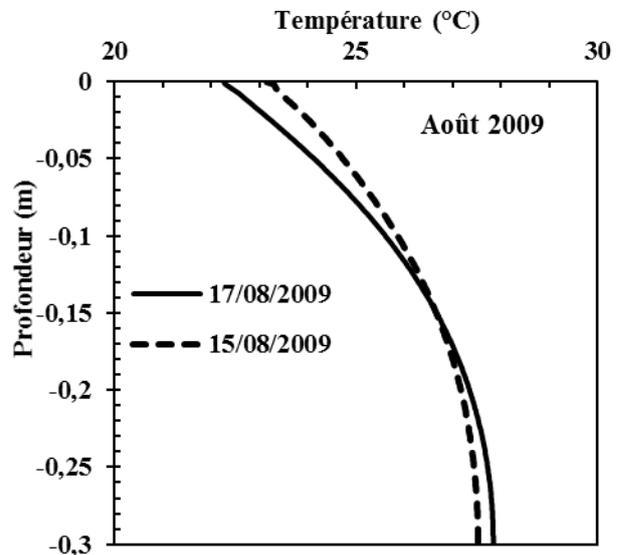


Figure 10 : Profil de température pour deux dates, Août 2009

Un écart important est observé dans le profil de température pour le mois de juin avant et après la pluie à l'opposé du mois d'août. En effet, le mois de juin de la zone d'étude est connu par une température de l'air élevée et des vents de fortes vitesses, ce qui entraîne une variabilité importante de l'humidité relative de l'air avec une hausse du taux d'évaporation. Cet état climatique va jouer sur la température du sol.

Par contre, pour le mois d'août, l'humidité de l'air plus élevée réduit le flux évaporatif et donc le flux de chaleur dans les couches de sol sous la surface. Dans tous les cas, on pourra dire que la température varie très peu en dessous de 25 cm de profondeur. Ainsi, on pourrait négliger les variations de la température des couches profondes des sols des zones arides et semi-arides dans la modélisation, la simulation de certains phénomènes de transport. Cependant, dans la couche superficielle du sol, l'on ne peut négliger la variation de la température. Elle est d'ailleurs un élément clé dans les processus physico-chimiques dans cette première couche d'activités intenses comme les interactions racines (cultures vivrières et maraichères) avec la solution de sol, la décomposition du compost par les micro-organismes, etc.

3-3. Comparaison entre les températures prédites et mesurées

Les **Figures 11 et 12** permettent de comparer la température à la surface du sol prédite par la simulation sous HYDRUS-1D à la température mesurée. Les températures sont mesurées à 2 m de la surface du sol tandis que celles prédites par HYDRUS-1D sont prises à la surface du sol. Nous émettons alors l'hypothèse qu'à 2 m du sol, la température a une corrélation forte avec celle de la surface pour faire les comparaisons. Il apparaît un bon accord entre les températures. Les écarts observés pour le mois d'août peuvent provenir de la non prise en compte dans la simulation de la température de l'eau de pluie.

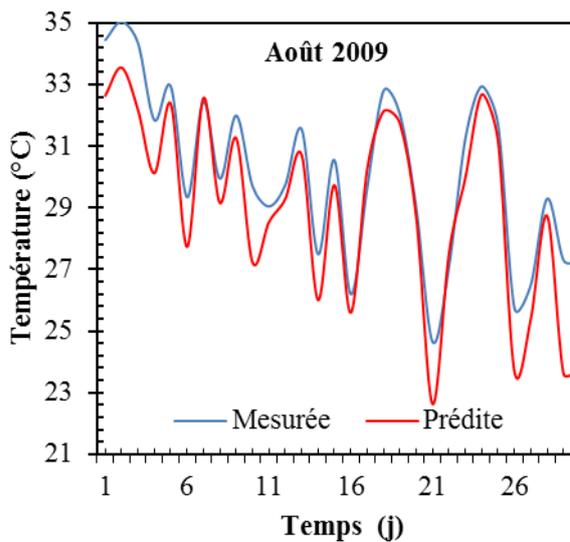


Figure 11 : *Comparaison des températures prédites et mesurées, juin 2009*

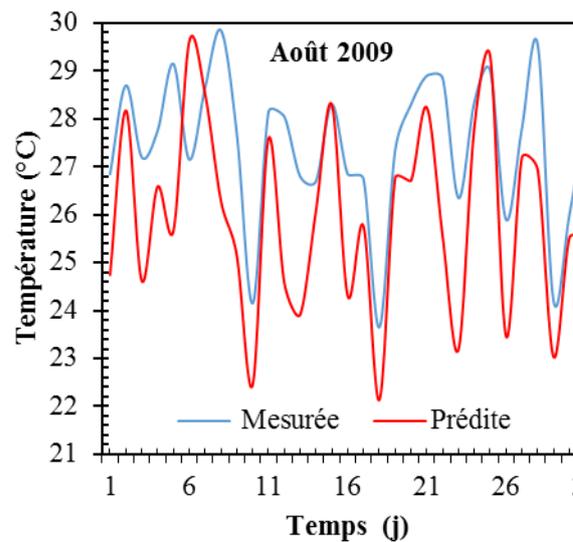


Figure 12 : *Comparaison des températures prédites et mesurées, août 2009*

Les **Figures 13 et 14** ci-dessous confirment la forte corrélation entre les températures prédites et mesurées. Le coefficient de détermination linéaire va de 0,84 pour le mois de juin à 0,67 pour le mois d'août. Somme toute, nous pouvons affirmer que le code HYDRUS-1D permet une meilleure prédiction de la température à la surface du sol et alors le flux de la chaleur à l'interface sol-atmosphère.

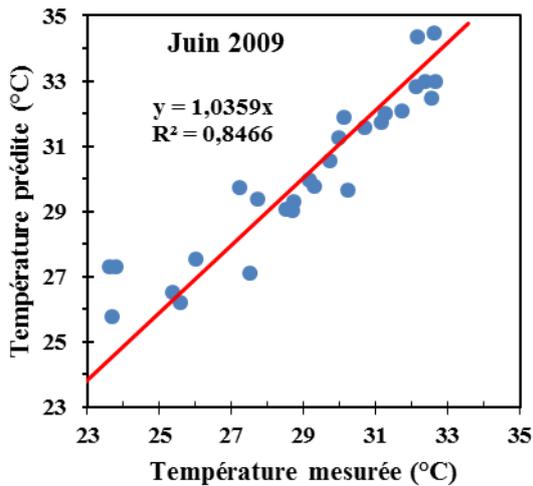


Figure 13 : *Corrélation températures prédite et mesurée, juin 2009*

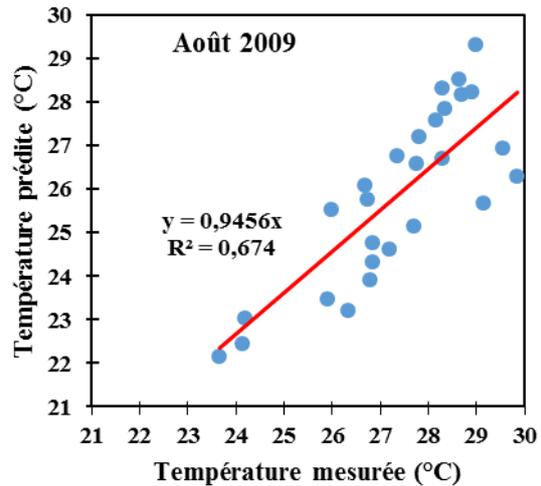


Figure 14 : *Corrélation températures prédite et mesurée, août 2009*

4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce manuscrit une étude de transferts couplés d'eau dans ses phases liquide, vapeur et de la chaleur dans un sol sableux non saturé. Les résultats de caractérisation des propriétés physiques et hydrodynamiques d'un sol type aride du Burkina Faso ont permis d'alimenter le code de simulation HYDRUS-1D. Nous nous sommes intéressés à l'évolution temporelle et verticale de la teneur en eau volumique et de la température pour un profil de sol assimilable à une colonne de sol sans couvert végétal de profondeur 0,30 m. Une période d'activité agricole allant de juin à août de l'année 2009 est considérée dans l'étude. Les variations de la teneur en eau dans le sol prédites sont en cohérence avec les hauteurs de précipitations et le type de sol à l'étude. La texture sableuse du sol et les températures relativement élevées expliquent les pics pointus des teneurs en eau observées à la surface du sol pour la période concernée. Les températures prédites et mesurées sont en très bon accord. Ce résultat est une première approche qui va nous permettre de révéler la robustesse du code de simulation HYDRUS sur l'évaluation du bilan hydrique et énergétique d'un sol en milieu aride. Pour bien exploiter les potentialités de cet outil de simulation dans la gestion des ressources en eau et des sols, des investigations supplémentaires sont nécessaires entre autres des mesures in situ des profils de températures et d'humidité à différentes profondeurs. La prise en compte des variabilités climatiques va permettre de faire des projections à court et long termes pour une gestion rationnelle et intégrée des ressources hydriques.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à la Direction Générale de la météorologie du Burkina Faso (DGM) pour avoir gracieusement fourni les données de forçage météorologique utilisées dans cette étude.

Références

- [1] - F. OUÉDRAOGO, Etude des transferts d'eau à l'interface sol-atmosphère cas d'un sol du Burkina Faso à faible teneur en eau, *Thèse de doctorat unique, Université Montpellier II (France) - Sciences et Techniques du Languedoc*. (2008).
- [2] - M. SKOURI, Equilibre alimentaire, agriculture et environnement en Méditerranée, *Options Méditerranéennes, Sér. A /n °24 (1994), Division des sciences écologiques, UNESCO, Paris (France)*.
- [3] - M. ANNABI, Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine, relation avec les caractéristiques de leur matière organique. *Thèse de doctorat, Institut National Agronomique de Tunis*(2005).
- [4] - F. OUÉDRAOGO, F. CHERBLANC, B. NAON, J. C. BÉNET, Water transfer in soil at low water content. Is the local equilibrium assumption still appropriate" *Journal of Hydrology*, 492 (2013) 117-127.
- [5] - J. SIMUNEK, M. SEJNA, H. SAITO, M. SAKAI, M. TH. VAN GENUCHTEN, The HYDRUS-1D software Package for simulating the movement of water, heat, and Multiple Solutes in variably saturated media, version 4.0. *HYDRUS software Series 3, Department of environmental sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA*, (2008) p. 315.
- [6] - M. B. KEBRÉ, Gestion des Ressources en Eau dans les Régions Arides: Analyse Expérimentale d'un Sol Type du Burkina Faso et Modélisation Numérique des Transferts d'Eau ». *Thèse de doctorat, Civil Engineering, Université Montpellier II (France) - Sciences et Techniques du Languedoc*, (2013) <tel-01012040>.
- [7] - M. B. KEBRÉ, F. OUÉDRAOGO, B. NAON, F. ZOUGMORÉ, F. CHERBLANC. Soil-Water Characteristic Curve Modeling at Low Water Content: Empirical and Semi-Empirical Approaches, *International Journal of Engineering Research*, 2 (7) (2013) 432 -437.
- [8] - J. R. NIMMO, E. E MILLER, The temperature dependence of isothermal moisture vs potential characteristics of Soils, *Soil Sci. I. Theory. Soil Sci. Soc. Am. J.* 60 (1986) 1001-1009.
- [9] - M. SAKAI, N. TORIDE, J. SIMUNEK, Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column. *Soil science society of America journal* 73 (2009), 707-717.
- [10] - H. SAITO, J. SIMUNEK, B. MIHANTY, Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor, and Heat Transport, *Vadose Zone Journal* 5 (2006) 784-800.