



ETUDE DE CORRELATION ENTRE L'HUMIDITE, LA TEMPERATURE MESURE IN-SITU ET SIMULE AVEC HYDRUS-1D: CAS DE NEGUELA AU MALI

STUDY OF CORRELATION BETWEEN HUMIDITY, TEMPERATURE IN-SITU AND SIMULATED MEASUREMENT WITH HYDRUS-1D: CASE OF NEGUELA IN MALI

| Bouréma Souleymane Traoré ^{1*} | Souleymane Sanogo ¹ | Marcel Bawindson Kébre ² | Kevin Landry Ouedraogo ² |
Hamidou Konaré ³ | François Ouedraogo ² | Abdramane Ba ¹ | et | François Zougmore ² |

¹. USTT-B | FST, Laboratoire d'Optique de Spectroscopie et des Sciences de l'Atmosphère (LOSSA) | BPE3206 | Bamako | Mali |

². Université de Ouagadougou, UFR-SEA, Laboratoire de Matériaux et Environnement (LAME) | | BP 7021 Ouaga 03 | Burkina Faso |

³. Laboratoire de Sols-Plantes-eau à l'Institut d'Economie Rurale (IER) de Sotuba | Bamako | Mali |

| Received | 25 September 2017 |

| Accepted | 04 October 2017 |

| Published 10 October 2017 |

RESUME

Introduction : Les changements climatiques impactent presque tous les domaines de la vie. Des recherches sont menées de plus en plus sur les processus d'interaction entre sol-végétation-atmosphère qui demeurent un problème majeur de nos jours. **Contexte :** Ce travail est mené dans le cadre de la gestion des ressources en eau en milieu aride et semi-aride. Plus spécifiquement dans les transferts de vapeur et de chaleur sur le site expérimentale de LOSSA à Neguela au Mali. **Objectifs :** L'objectif de cette étude est de mesurer et simuler les humidités (teneur en eau volumique) et les températures dans le sol. Elle consiste également à déterminer les corrélations de ces deux paramètres mesurés in-situ et prédites. **Méthodes :** Nous utilisons une colonne de sol de profondeur 1 mètre, subdivisée en différentes couches (5cm, 30cm, 60cm et 100cm) sans végétation avec une période d'étude s'étalant sur toute l'année 2016. Nous représentons l'évolution des températures, des humidités, mesurées in-situ et celles prédites avec HYDRUS-1D. Une étude comparative entre les valeurs des températures, des humidités est faite en déterminant les corrélations à partir des méthodes statistiques telles la méthode graphique, le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson, la significativité et la corrélation r-carré. **Résultats :** Nous présentons l'évolution temporelle des humidités et des températures mesurées in-situ et celle simulée dans les différentes couches du sol. L'analyse des résultats montre une forte significativité avec une forte probabilité inférieure à 0,001 soit 99,99 % pour les quatre couches. Avec des coefficients de Pearson de 0,77 et 0,65 pour l'humidité pour les deux premières couches et 0.86 pour la 1^{ère} et 3^{ème} couche. **Conclusions :** L'étude a permis de connaître le lien qui existe entre les évolutions de la température et l'humidité in-situ et prédites dans le sol avec les données de forçage atmosphérique. La dynamique de l'eau dans le sol est fortement corrélée avec la température. Les températures et humidités simulées sont en bon accord avec les valeurs mesurées, ce qui montre la robustesse du code HYDRUS-1D dans l'établissement d'un bilan hydrique et énergétique d'un sol en milieu aride. Ces résultats sont des premières approches pour une optimisation de la gestion d'eau.

Mots-clés : gestion de l'eau, HYDRUS-1D, sol insaturé, humidité du sol, température du sol, évolution temporelle, corrélation.

ABSTRACT

Introduction: Climate change affects almost every area of life. The Research is being conducted increasingly on the processes of soil-vegetation-atmosphere interaction that remain a major problem today. **Context:** This work is carried out within the framework of the management of water resources in arid and semi-arid environment. More specifically in the transfer of vapor and heat flux to the experimental, site of LOSSA in Neguela, Mali. **Objectives:** The objective of this study is to measure and simulate soil moisture (water volumetric content) and temperature. It consists to determinate the correlations of these two parameters between measured in-situ and simulate. **Methods:** We use a soil column of depth 1 meter, subdivided into different layers (5cm, 30cm, 60cm and 100cm) without vegetation with a period of study spread over the whole of 2016. We represent the evolution of temperatures, moisture measured in-situ and those predicted with HYDRUS-1D. A comparative study of temperature and moisture values is made by determining the correlations from statistical methods such as the graphical method, the Bravais-Pearson correlation coefficient, the significance and the r-square correlation. **Results:** we present the temporal evolution of the moisture, temperatures measured in-situ, and those simulated in the different layers of soil. The analysis of the results shows a strong significance with a high probability less than 0,001 or 99.99 % for the four layers. Pearson coefficients of 0.77 and 0.65 for moisture are found for the first two layers and 0.86 for the first and third soil layers. **Conclusion:** This study allows us to know the link between the evolutions of temperature, moisture in a soil column with atmospheric forcing data. The simulated temperatures and moisture are in good agreement with the measured values, which shows the robustness of the HYDRUS-1D code in the establishment of a water and energy balance of an arid soil. These results are initial approaches for optimizing water management.

Keywords: management of water, HYDRUS-1D, soil humidity, soil temperature, temporal evolution, correlation.

1. INTRODUCTION

De nos jours, l'impact du changement climatique est l'un des problèmes les plus préoccupants de la planète. Il intervient dans presque tous les domaines de la vie humaine. La recherche des solutions pour son éradication ne se limite pas qu'aux scientifiques, mais engendre l'émergence des groupes et organisations gouvernementales et des organisations non gouvernementales engagés dans les questions environnementales (FOA, GIEC, WWF, CCNUCC,...). Le Sahel est sujet à des variations annuelles qui rendent difficile la mise en place de stratégies agricoles. Les transferts de chaleur et de masse d'air par évaporation à partir des surfaces d'eau libre sont d'une importance majeure dans les régions arides et semi arides [1]. L'humidité du sol est une composante cruciale du système retour que la mémoire météorologique transmet au système climatique sur les surfaces terrestres [2,3]. A l'échelle locale, l'humidité du sol contrôle le partage de la masse et de l'énergie entre la surface terrestre et l'atmosphère à travers des flux de surface lents et de chaleur sensible. Il atténue également le flux de chaleur du sol [4]. Le Mali est un pays essentiellement agro-sylvio-pastoral de la zone soudano-sahélienne. La fertilité et l'eau du sol sont les principaux facteurs qui augmentent le rendement des cultures [5]. L'étude de l'écoulement de l'eau et du transfert de chaleur dans la zone non saturée du sol est devenue un domaine interdisciplinaire pour peu que l'on veuille prendre en compte les couplages multi physiques et les phénomènes physico-chimiques qui peuvent s'y développer.

L'études mené par Bradley et al., (2004) portaient sur une période de 6 ans (1997-2002) de données de l'humidité du sol afin d'analyser le cycle annuel et les caractéristiques temporelles sur le site de Oklahoma [6]. Les travaux de Lohou et al., (2014) étaient basés sur la réponse de l'humidité à la surface simulée par neuf modèles de surface terrestre impliqués dans AMMA Land Model Intercomparison Project (ALMIP) comparé à l'observatoire d'AMMA [7]. En outre Longobardi (2008) s'est à l'étude de la variabilité temporelle de l'humidité du sol dans les conditions climatiques fluctuantes est faite par [8]. Pour Traore et al., (2016), ils se sont penchés sur l'utilisation de l'HYDRUS-1D pour simuler les transferts couple d'eau et de chaleur dans un sol non saturé en milieu semi-aride [9].

D'autres auteurs ont analysé le flux de vapeur dans un sol à faible teneur en eau ou une simple approche pour estimer la conductivité hydraulique relative dans un sol sablonneux [10].

Aucun de ces travaux antérieurs n'a fait une étude comparative entre les résultats du logiciel Hydrus-1D pour les simulations numériques et les mesures in-situ. Ce logiciel est beaucoup utilisé dans les pays tempérés et est nécessaire pour la validation dans les régions arides et semi - arides. Aussi, ils permettent de prendre en compte des paramètres agro-météorologiques.

- Quelle est la variabilité temporelle la température et de l'humidité (teneur en eau volumique) dans une colonne de sol à une échelle locale ?
- Quelles sont les corrélations entre les mesures in situ et la simulation numérique avec le modèle Hydrus-1D ?

Ce travail vise à étudier la performance du logiciel Hydrus-1D version 4.1.16 à simuler l'humidité et la chaleur d'un sol en prenant en compte l'influence des paramètres agro-météorologiques à une échelle locale. Des corrélations permettront de prédire dans une échelle plus large, l'évolution des propriétés hydriques du sol pour une bonne planification, gestion efficace et efficiente de l'eau au regard des pratiques agricoles. Cette étude se fait à Néguela qui est situé dans la zone soudanienne au Mali.

2. MATERIELS AND METHODES

2.1 Présentation du site d'étude :

La zone d'étude est située dans la forêt classée de Néguela. Cette forêt classée se situe à 60km environ à l'Ouest de Bamako. Elle se trouve sur la route Nationale Kati - Kita où sa limite a été définie par la Direction Nationale des Eaux et Forêts [11]. C'est une zone qui se trouve dans la région de Koulikoro au Mali. Elle couvre environ 70.000ha et appartient au plateau Mandingue situé dans le haut bassin du fleuve Sénégal, entre les méridiens 8°30' - 8°50'W et les parallèles 12°50' - 13°08N. Le sol choisi pour notre étude provient du site expérimentale de LOSSA à l'intérieur de la réserve de Bossofara entre (12°87' Nord de latitude et 8°47' Ouest de longitude avec une l'altitude 364 m). Dans les deux premières couches la texture de notre sol est limoneux et limoneux-sableux dans les deux dernières couches.

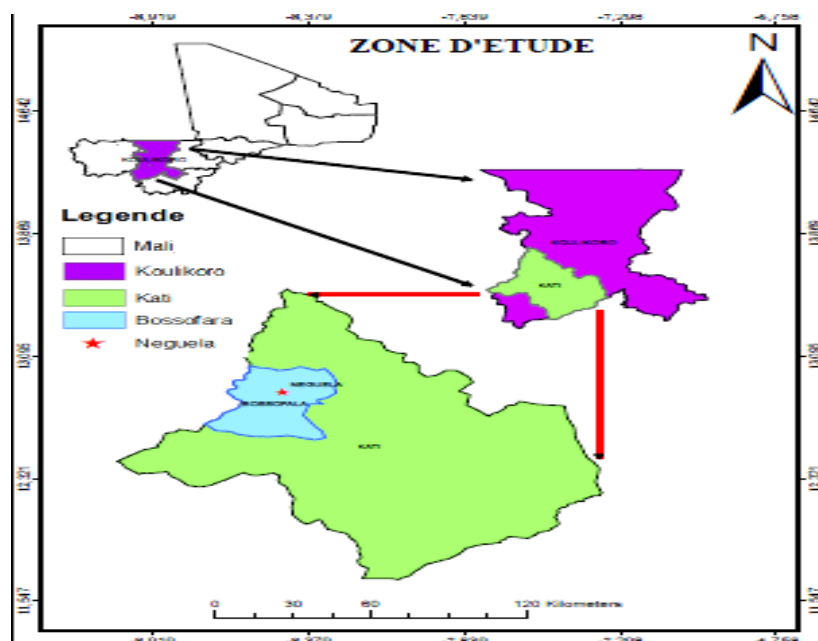


Figure 1 : la figure montre la localisation du site d'étude.

2.2 Collecte des données : Les données de mesures d'humidité, de température et des paramètres météorologiques sont de Janvier-Décembre 2016. Les paramètres météorologiques sont mesurés chaque 30 minute par une station automatique Weather Halk. Et une station de flux de Campbell pour les quatre sondes TDR (CS650L) qui donne par pas de temps de 15 minutes l'humidité et la température. Les TDR sont insérées successivement à 5, 30, 60 et 100 cm du sol (figure2).

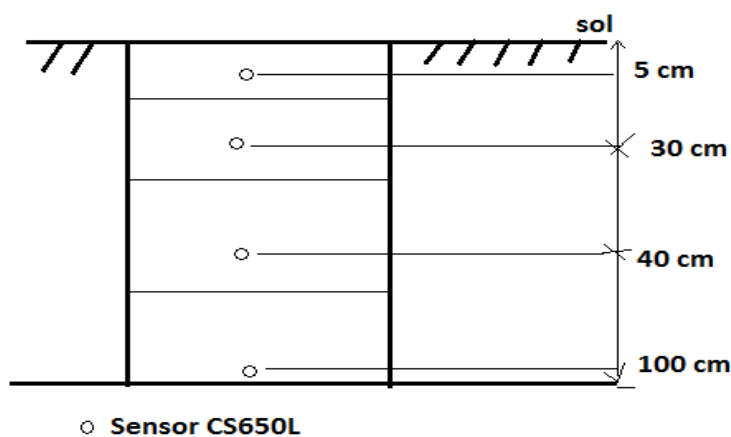


Figure 2 : la figure présente les niveaux des capteurs dans le sol

2.3 Présentation de Hydrus : La gamme de logiciels HYDRUS est développée par l'U.S. Laboratoire du sol en coopération avec le Centre International de la modélisation de la teneur en eau de l'Université de Californie. Ces logiciels sont commercialisés par PC-Progress. Ce logiciel modélise les flux hydriques dans la zone non saturée du sol par la résolution de l'équation de Richards. Le calcul aux éléments finis s'appuie sur un maillage régulier.

HYDRUS propose un ensemble de processus principaux pouvant être combinés : écoulement d'eau, transport de solutés, transport de chaleur et prélèvement racinaire d'eau (transpiration végétale). Nous avons utilisé l'écoulement d'eau et le transport de chaleur. La description qui suit concerne ces deux processus. Une description complète du logiciel HYDRUS se trouve dans le manuel technique [12]. Le logiciel a plusieurs versions HYDRUS-1D, HYDRUS (2D/3D). Ces logiciels sont commercialisés par PC-Progress. La version Hydrus-1D version 1.4.16 sera utilisée pour le présent travail.

2.4 Paramètres d'entrée du code Hydrus : Les grandeurs qui permettent de définir les propriétés physiques d'un sol sont: la densité, la masse volumique, la porosité, l'indice des vides, et la teneur en eau. Pour un sol, il existe deux types de densité. La densité réelle ou densité des particules solides ρ_s^* qui est défini comme la masse de solide par unité de volume des grains solides ; la densité apparente ou densité sèche ρ_s qui représente le rapport de la masse de la phase

solide et du volume total du sol. Pour le sol en étude, la valeur de la densité réelle de la phase solide est de 2650 kg/m³. La méthode du cylindre (norme NF X31-501) a permis de mesurer la densité apparente. Le tableau 3 résume les propriétés physiques du sol en étude.

Tableau 1 : le tableau montre les propriétés physiques des différentes couches du sol.

Depth (cm)	Sand%	Loam%	Clay%	Texture	ρ_s kg/m ³
0 – 5	35	55	10	L	1953.6
10-50	43	49	8	L	1290
50-80	60	38	2	L-S	1881
80-100	65	32	2	L-S	1168

Tableau 2 : le tableau montre les valeurs des humidités initiales des couches (conditions initiale) pour Hydrus-1D.

θ_{i1} (m ³ m ⁻³)	θ_{f1} θ_{i2} (m ³ m ⁻³)	θ_{f2} θ_{i3} (m ³ m ⁻³)	θ_{f3} θ_{i4} (m ³ m ⁻³)	θ_{f4} (m ³ m ⁻³)
0,0347	0,035	0,0645	0,0826	0.0899

Tableau 3 : le tableau montre Les paramètres d'entrées utilisées par HYDRUS-1D.

Depth (cm)	θ_r (m ³ /m ³)	θ_s (m ³ /m ³)	n (-)	m (-)	Ks (cm/s)	α (1/cm)	L (-)
0 – 5	0	0,1345	1,4	0,33	24.96	3.33	0,5
10-50	0	0,3978	1,4	0,33	24.96	3.33	0,5
50-80	0	0,1542	1,4	0,33	24.96	3.33	0,5
80-100	0	0,4788	1,4	0,33	24.96	3.33	0,5

- Conditions aux limites appliquées à l'hydrus-1D

La figure 3 schématise notre colonne de sol subdivisée en quatre couches avec les différentes conditions aux limites. Sur la limite supérieure on applique les conditions atmosphériques. Un flux constant est appliqué sur les parois latérales du domaine. Un drainage libre est appliqué sur la limite du fond du domaine.

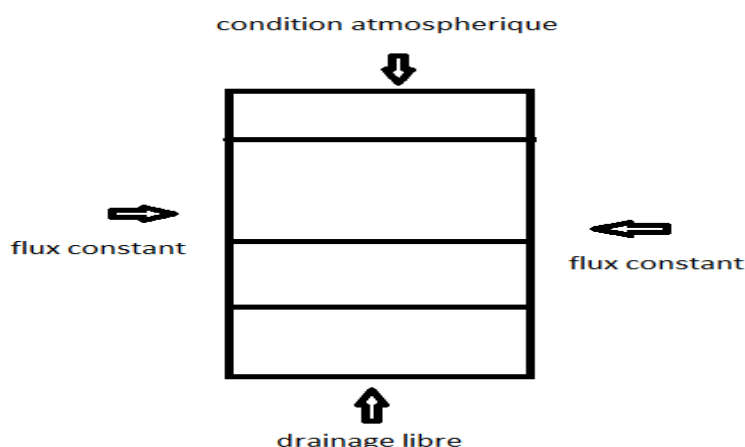


Figure 3 : La figure montre les conditions aux limites.

2.5 Formules statistiques : Les méthodes statistiques sont des techniques élaborées afin d'étudier la relation qui pourrait exister entre deux ou plusieurs variables quantitatives.

- Analyse graphique

L'analyse graphique est une bonne méthode qui permet de comprendre la relation qui lie deux variables (X, Y). Le graphique considéré comme un outil privilégié est le graphique des « nuages de points ». Cette méthode consiste à

placer en abscisse la variable X et en ordonnée la variable Y. Chaque observation est positionnée dans le repère considéré. Les nuages de points permettent de connaître le signe et l'intensité de la corrélation.

Pour le signe, on utilise la pente de la régression et pour l'intensité, on regarde la densité du nuage de point.

- Coefficient de corrélation de Bravais-Pearson

C'est un indice statistique qui montre l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives. Ce coefficient permet de détecter la présence ou l'absence d'une **relation linéaire** entre deux caractères quantitatifs continus.

Le coefficient de corrélation linéaire r de deux caractères X et Y est égal à la covariance de X et Y divisée par le produit des écarts-types de X et Y.

$$r(X, Y) = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

COV (X,Y) est la covariance définie par :

$$COV(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2)$$

Les coefficients \bar{x} et \bar{y} sont définis respectivement par les équations (3) et (4) sont les écarts types de X et de Y :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (4)$$

Le coefficient $r(x ; y)$ varie entre -1 et +1.

- si r est proche de 0, cela exprime une absence de corrélation (pas de relation linéaire entre X et Y),
- si r est proche de -1, il existe une forte relation linéaire négative entre X et Y,
- si r est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive entre X et Y.

Un coefficient positif décrit une corrélation directe, c'est-à-dire que les deux variables tendent à croître ou à décroître ensemble. En revanche, un coefficient négatif décrit une corrélation indirecte c'est-à-dire que l'une des variables tend à décroître lorsque l'autre croît.

Le **signe** de r indique donc le sens de la relation tandis que la valeur absolue de r indique l'**intensité** de la relation c'est-à-dire la capacité à prédire les valeurs de Y en fonctions de celles de X.

- Coefficient de détermination R^2

Le coefficient de détermination R^2 est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire, simple ou multiple. D'une valeur comprise entre 0 et 1, il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées.

Il existe deux façons de le définir :

* On fait le carré du coefficient de corrélation dans le cas d'une régression linéaire simple.

* La deuxième façon est beaucoup plus riche car elle s'applique aussi bien à une régression simple qu'à une régression

multiple. Dans ce cas, le coefficient de détermination R^2 est la proportion de $SCE_{\bar{y}}$ expliquée par la droite des moindres carrés (D) d'équation. On a :

$$y = m x + b. \quad (5)$$

Le coefficient de détermination a pour expression :

$$R^2 = (1 - \frac{SCE_D}{SCE_{\bar{y}}}) \quad (6)$$

SCE_D est la somme des carrés des erreurs de la droite (D) et a pour expression :

$$SCE_D = e_1 + e_2 + \dots + e_n \quad (7)$$

$$\text{Avec les } e_i = (y_1 - (mx_1 + b))^2 + (y_2 - (mx_2 + b))^2 + \dots + (y_n - (mx_n + b))^2 \quad (8)$$

$$\text{Et } SCE_{\bar{y}} = (y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2 \quad (9)$$

$SCE_{\bar{y}}$ est la somme des carrés des écarts moyens \bar{y} .

On a SCE_D qui est défini comme la partie de la somme des carrés des écarts ($SCE_{\bar{y}}$) qui n'est pas expliquée par la droite (D).

Et $\frac{SCE_D}{SCE_{\bar{y}}}$ est la proportion de $SCE_{\bar{y}}$ qui n'est pas expliquée par la droite (D).

Lorsque SCE_D est :

- Est petite, la droite (D) est un bon ajustement du nuage des points. Alors le coefficient de détermination R^2 est proche de 1 et les nuages de point se rapproche de la droite des moindres carrés.
- Est grande, la droite (D) n'est pas un bon ajustement. Alors, le coefficient de détermination R^2 est proche de 0 et les nuages de point diffusent autour de droite des moindres carrés.

- test de significativité

Après avoir calculé successivement le test spécifique t et le seuil critique Rc par les formules suivantes, on en déduit la probabilité ou p-value :

$$t = \frac{T}{\sqrt{\frac{1-T^2}{n-2}}} \quad (10)$$

t est la lois d'étude dans (n-2) degré libre et T est la moyenne de R(X,Y) ;

$$|t| > t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-2) \quad (11)$$

* La probabilité ou p-value

P value est la probabilité d'obtenir un effet au moins aussi extrême que celui de vos données d'échantillonnage en supposant la vérité de l'hypothèse nulle.

3. RESULTS

3.1 Evolution temporelle de l'humidité

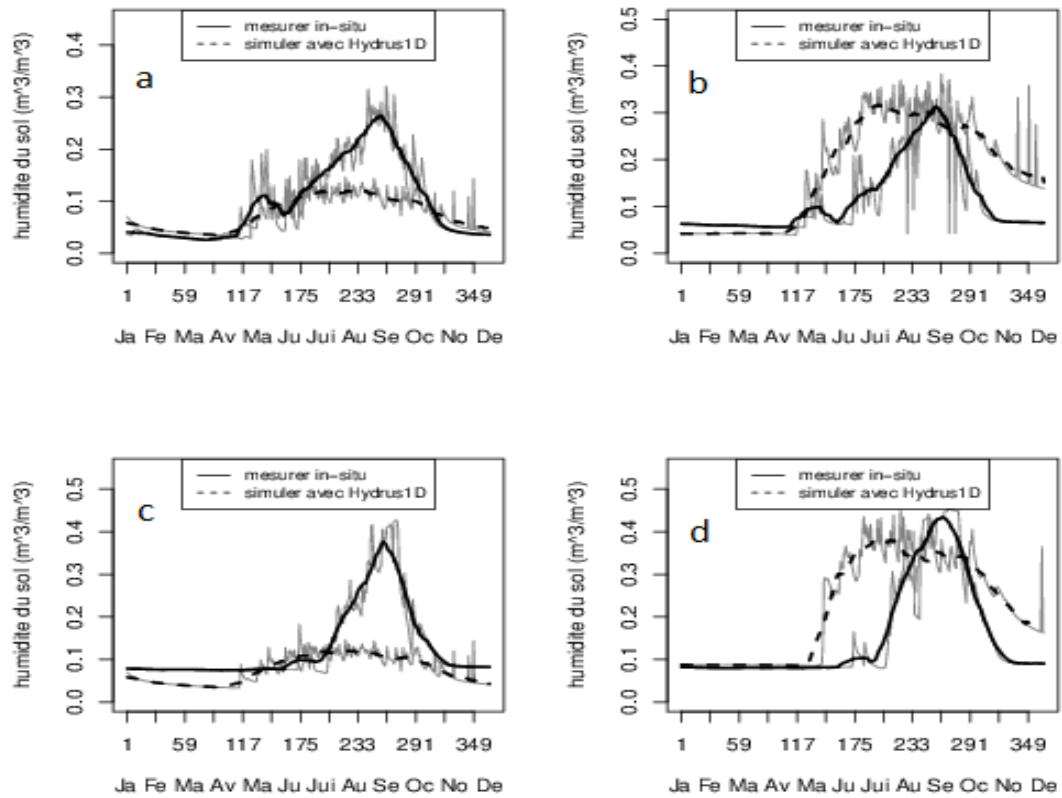


Figure 4 : La figure montre la variabilité annuelle de l'humidité du sol a- 5cm, b- 30cm, c-60cm et d-100cm.

La Figure 4 montre la variabilité annuelle de l'humidité du sol a la surface du sol en a (5cm), b a la couche 10-50 (30cm), c couche 50-80cm (60cm) et d a la couche 80-100 (100cm). D'une manière générale, on observe 3 phases sur toutes les 4 courbes. Une 1ère phase de janvier-juillet (période sèche), une 2^{ème} de Juillet-octobre (saison de pluie) et une 3^{ème} phase d'octobre-Décembre.

3.2 Evolution temporelle de la température

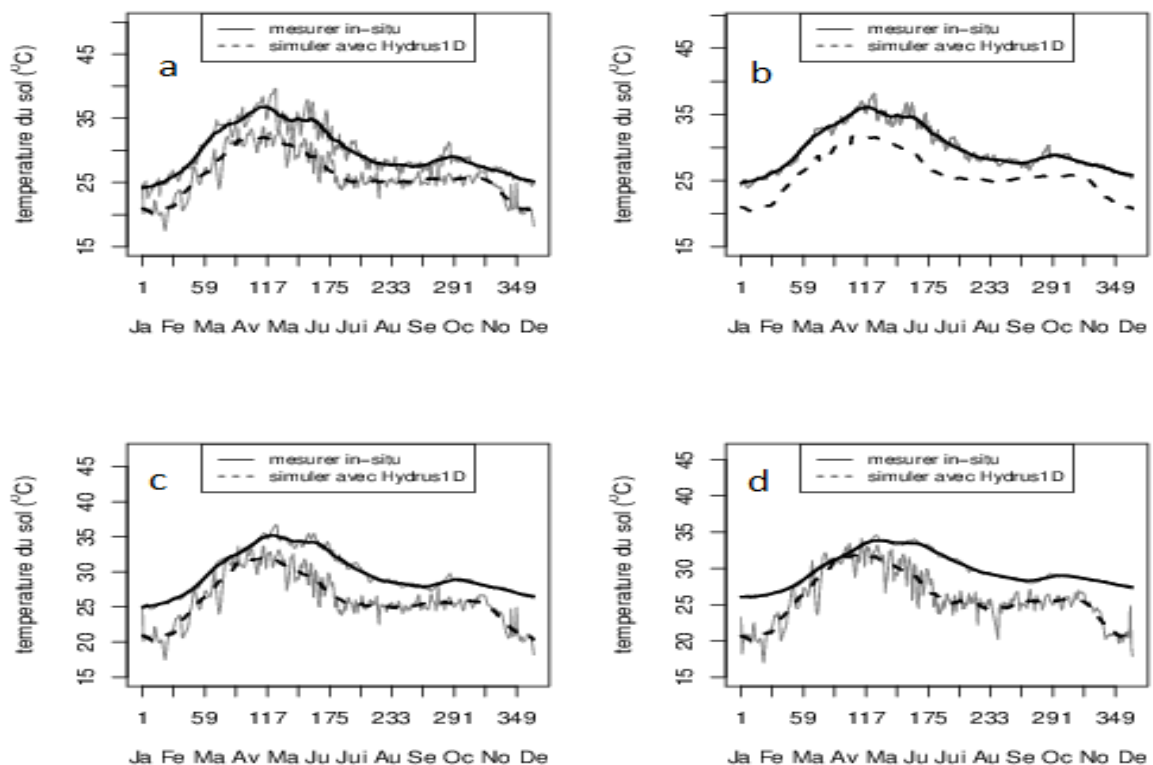


Figure 5 : La figure montre la variabilité annuelle de la température du sol a- 5cm, b- 30cm, c-60cm et d-100cm.

La figure 5 nous montre la variabilité annuelle de la température du sol à 4 niveaux différents. On observe sur toutes les courbes trois phases également comme l'humidité. Une 1^{ère} phase de janvier-Juillet (température très élevée), une 2^{ème} de Juillet-octobre (température basse) et une 3^{ème} octobre-Décembre (température moins élevée). D'une manière générale on voit que le modèle HYDRUS-1D sous-estime les températures dans le sol.

3.3 Evolution des corrélations

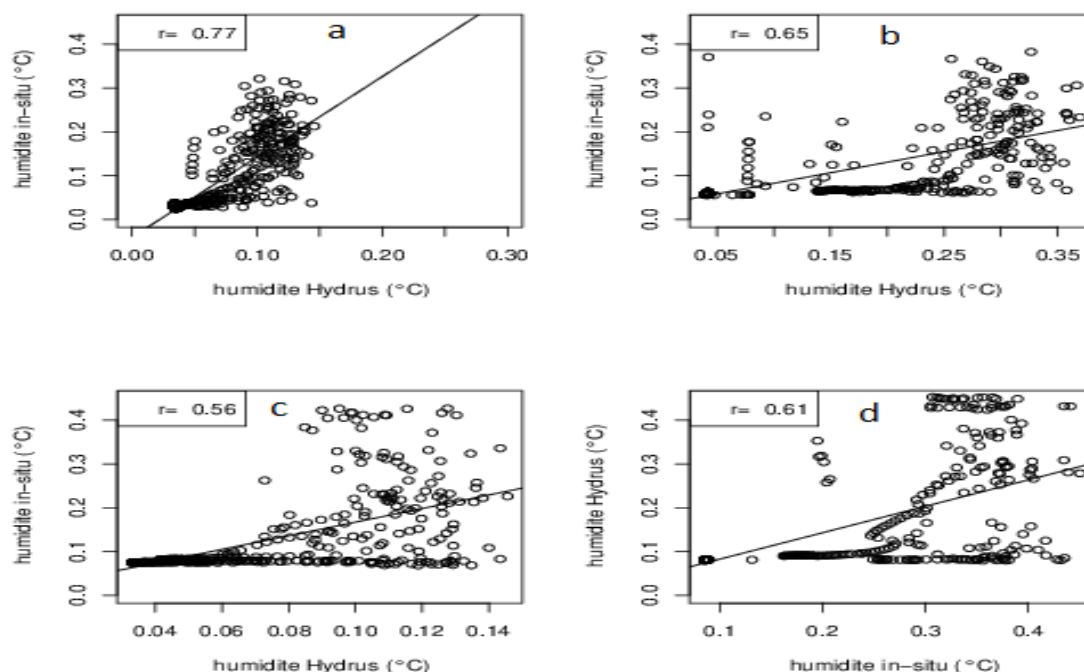


Figure 6 : La figure montre la corrélation annuelle entre température du sol mesurés in-situ et prédites avec HYDRUS-1D a- 5cm, b- 30cm, c-60cm et d-100cm.

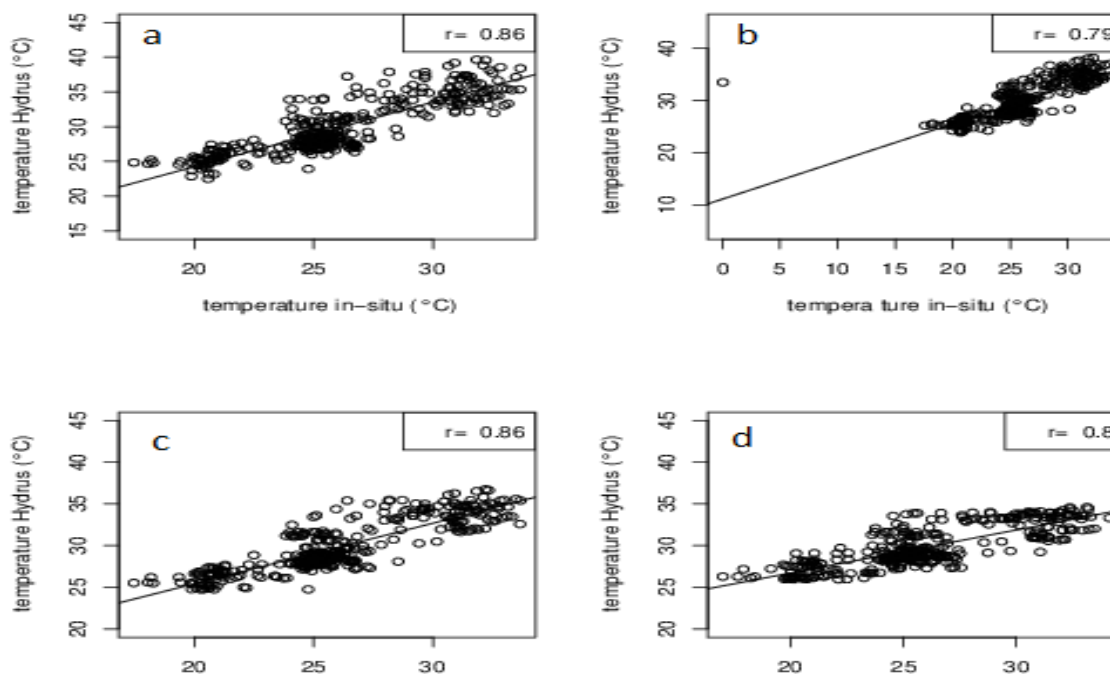


Figure 7 : La figure montre la corrélation annuelle entre l'humidité du sol mesurés in-situ et prédites avec HYDRUS-1D a- 5cm, b- 30cm, c-60cm et d-100cm.

Les figures 6 et 7 donnent les graphiques des coefficients de R de Pearson. Il ressort dans ces différentes analyses que la température a une très bonne corrélation au niveau des deux couches (1 et 3). Par contre pour l'humidité on trouve successivement 0,77 et 0,65 pour les deux premières couches. Dans tous les quatre niveaux du sol étudiés le modèle HYDRUS-1D a une significativité très forte avec une probabilité inférieure à 0,001 soit 99.99% pour l'humidité et la température à une profondeur de 1 mètre.

Tableau 4 : le tableau montre un récapitulatif des corrélations entre les valeurs in-situ et celles simulées

Humidité	R	R ²	P-value	Temperature	R	R ²	P-value
0 – 5	0,77*	0,59*	<0,001	0 – 5	0,86*	0,74*	<0,001
10-50	0,65*	0,42*	<0,001	10-50	0,79	0,63	<0,001
50-80	0,56	0,31	<0,001	50-80	0,86*	0,73*	<0,001
80-100	0,61	0,37	<0,001	80-100	0,680	0,63	<0,001

4. DISCUSSIONS

Nos résultats montrent une bonne co-fluctuation de l'humidité au niveau de la 2^{ème} couche et est légèrement moins bonne à la 4^{ème} couche comme celle observé dans d'autre étude [13]. Ce léger résultat pour la 4^{ème} couche peut être dû à la texture limoneuse-sableuse de la quatrième couche. Sur la figure 4a et figure 4c le modèle HYDRUS a une bonne corrélation sur les phases 1 et 3. Ce constat dans ces 2 phases peut être dû à une variation presque constante de l'humidité. Par contre en 2^{ème} phase (saison de pluie) il sous-estime l'humidité du sol. Les températures élevées observées dans cette période conduisent à une brusque augmentation de taux d'évaporation. Ce qui va entraîner une chute brutale de l'humidité. Sur les figures 4b et 4d on observe un décalage entre ces deux courbes à la 2^{ème} phase. Ce décalage peut être justifié de faite que seules les valeurs des précipitations au niveau des paramètres du flux évaporatifs sont considérées.

Dans les figure 5 (a,b,c et d), nous montre une légère atténuation des températures en profondeur et un déphasage progressif lié à l'inertie du sol. Ce phénomène est dû à la forte variabilité de température observée à la surface du sol et est liée aux flux d'énergies surfaciques importants générés par les interactions à l'interface sol-atmosphère. Ce constat est similaire à celle révéle par plusieurs travaux [14, 15, 16, 17].

Nos coefficients de Pearson entre les humidités à la 2^{ème} et 4^{ème} couche sont en moyenne mieux corrélés et sont compris entre 0,65 et 0,61 contre 0,8 et 0,71 dans les travaux de Richard (2010) [13]. On note que le modèle utilisé par Richard (2010) ne reproduit pas l'augmentation marquée par les humidités en milieu de saison des pluies [13]. Par contre celle des températures à la surface de sol (1^{ère} couche) de Traore et al., (2016) est entre 0,84 et 0,67 successivement pour le mois de Juin et d'Aout contrairement à 0,77 pour notre cas d'étude présente [9]. Dans les travaux de Traore et al., (2016) la température du sol à la surface considérée est la température de l'air mesurée à 2 mètres et ses textures sableuses peuvent justifier cet écart [9].

5. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons effectué une étude de la distribution de l'humidité et de température dans un sol limoneux non saturé. Les paramètres physiques et hydriques du sol expérimental ont été également présentés. Nous nous sommes intéressés à l'évolution temporelle de l'humidité et de la température pour un profil de sol assimilable à une colonne de sol sans couvert végétal de profondeur 100 cm. Une période de campagne de mesure allant du début Janvier à fin Décembre de l'année 2016 est considérée dans l'étude.

Les variations de l'humidité dans le sol prédites sont en cohérence avec les hauteurs de précipitations et le type de sol à l'étude. La texture limoneuse 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 et les humidités prédites et mesurées sont en très bon accord en termes de significativité. Par contre la température a une très bonne corrélation au niveau des deux couches 1 et 3 (0-10 et 50-80 cm) et l'humidité pour les deux premières couches (0-10 et 10-50cm).

Ce résultat est une deuxième approche qui va nous permettre de confirmer 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 de la perméabilité à la saturation et l'échantillonnage de plusieurs site d'études à différentes profondeurs.

Reconnaissance

Cette étude a été entièrement financé par le Programme International des Sciences (**ISP**) à travers le Laboratoire d'Optique, de Spectroscopie et des Sciences de l'Atmosphère (**LOSSA**) à l'Université des Sciences Techniques and Technologiques de Bamako (**USTT-B**), Mali. Je remercie très sincèrement le Laboratoire de Matériaux et Environnement (**LAME**) à l'Université de Ouagadougou (**UO**) et le Laboratoire des Sols-eaux-Plantes à l'Institut d'Economie Rurale (**IER**), Sotuba, Bamako de m'avoir accueilli dans leurs laboratoires.

6. REFERENCES

1. N. Belarbi, M. Saighi. Etude comparative des méthodes d'évaluation du taux d'évaporation à partir d'une surface d'eau libre. Application aux régions arides et semi arides en Algérie, Jean-Jacques BEZIAN. *JITH*; (Aug 2007), Albi, France. ENSTIMAC, 5p, [\(hal-00157582\)](#)
2. Delworth T., Manabe S. The influence of soil wetness on near-surface atmospheric variability. *Journal of Climate*. 1989; 2: 1147–1462.
3. Delworth T., Manabe S. Climate variability and land surface processes. *Advances in Water Resources*. 1996; 16: 3–20.
4. Brubaker Kaye L. and Entekhabi Dara, Analysis of feedback mechanisms in land-atmosphere interaction. *Water resources research*. May 1996; 32(5):1343–1357.
5. Kouyaté Z. and Wendtg W. Gestion de l'eau et de la fertilité du sol au Mali, Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publ. no. 199.
6. Bradley G., Illston, Jeffrey B., Basara and Kenneth C. Crawford. Seasonal to interannual variations of soil moisture measure in Oklahoma. *International Journal of climatology*. 2004; 24: 1883–1896. Available on: Wiley InterScience, www.interscience.wiley.com. DOI: 10.1002/joc.1077.
7. Lohou F., Kergoat L., Guichard F., Boone A., Cappelaere B., Cohard J.-M., Demarty J., Galle S., Grippa M., Peugeot C., Ramier D., Taylor C. M. and Timouk F. Surface response to rain events throughout the West African monsoon. *Atmos. Chem. Phys.* 2014; 14: 3883–389. Available on :www.atmos-chem-phys.net/14/3883/2014/ doi:10.5194/acp-14-3883-2014.
8. Longobardi. Observing soil moisture temporal variability under fluctuating climatic conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2008; 5: 935–969.
9. Traore B.S., Kebre M.B., Ouedraogo F., Sanogo S., Zougmore F., Ba A. Utilisation de HYDRUS-1D pour une simulation des transferts couplés d'eau et de chaleur dans un sol non saturé en milieu semi-aride. *Afrique SCIENCE*. 2016; 12(1) :182-172. ISSN 1813-548X.
10. Kebre M.B., F., Cherblanc F., Ouedraogo F., Jamina B., Naonb, Zougmore F. and Beneta J.C. Water flow in soil at small water contents: a simple approach to estimate the relative hydraulic conductivity in sandy soil. *European Journal of Soil Science*. 2016. doi: 10.1111/ejss.12408.
11. Keita B., and Diallo D. Etude morpho pédologique des forêts classée Negala - Bossofala Baoule-Nafadji. Rapport d'activité, Direction Générale des eaux et forêt et le centre de recherche agronomique de sotuba, 1983, 31: 7 .
12. 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. Departement of environmental sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA* (2008) p. 315.
13. Richard. A. Modélisation simplifiée de la redistribution de l'eau sur un versant au Bénin Sensibilité aux caractéristiques du sol et à la végétation, Mémoire de stage M2R (2010), P 24. Availbale on : www.amma-catch.org/IMG/pdf/m2r_richard_10.pdf.
14. Nebbali R., Modélisation de la dynamique du climat interne distribué dans une serre de culture. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté (2008), France. Availbale on : www.ijsmdo.org/zh/articles/smdo/ref/2014/01/.../smdo130020.html.
15. Gao Z., Bian L., Hu Y., Wang L., Fan J., Determination of soil temperature in an arid region. *Journal on arid environments*. 2007; 71 : 157-168. Availbale on : Elsevier : https://www.researchgate.net/.../248353458_Modeling_of_soil_sur...
16. Saito H., Simunek J., Mihanty B. Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor, and Heat Transport. *Vadose Zone Journal*. 2006; 5: 784-800.
17. Sakai M., Toride N., Simunek J. Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column. *Soil science society of America journal*. 2009; 73: 707-717.

Citer cet article : Bouréma Souleymane Traoré, Souleymane Sanogo, Marcel Bawindsom Kebre, Kevin Landry Ouedraogo, Hamidou Konare, François Ouedraogo, Abdramane Ba, et François Zougmore. ETUDE DE CORRELATION ENTRE L'HUMIDITE, LA TEMPERATURE MESURE IN-SITU ET SIMULE AVEC HYDRUS-1D: CAS DE NEGUELA AU Mali. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. 2017; 5(4): 282-291.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>