



Physio-Géo

Géographie physique et environnement

Volume 11 | 2017

Varia 2017

Évaluation de vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration journalière de référence au Burkina Faso

Papa Malick Ndiaye, Ansoumana Bodian, Lamine Diop et Koffi Djaman



Édition électronique

URL : <http://physio-geo.revues.org/5369>

ISBN : 978-2-8218-0427-2

ISSN : 1958-573X

Éditeur

Claude Martin

Édition imprimée

Pagination : 129-146

ÉVALUATION DE VINGT MÉTHODES D'ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE DE RÉFÉRENCE AU BURKINA FASO

Papa Malick NDIAYE⁽¹⁾, **Ansoumana BODIAN**⁽¹⁾,
Lamine DIOP⁽²⁾ et **Koffi DJAMAN**⁽³⁾

(1) : Laboratoire Leïdi "Dynamique des territoires et développement", Université Gaston Berger (UGB), BP 234, SAINT-LOUIS, SÉNÉGAL. Courriels : papamalick55@outlook.com ; ansoumana.bodian@ugb.edu.sn

(2) : UFR S2ATA Sciences Agronomiques, d'Aquaculture et des Technologies Alimentaires, Université Gaston Berger, SAINT-LOUIS, SÉNÉGAL. Courriels : lamine.diop@ugb.edu.sn ; diop.18@osu.edu

(3) : Centre Régional du Riz (Africa Rice), Station Régionale du Sahel, BP 96, SAINT-LOUIS, SÉNÉGAL. Courriel : K.Djaman@cgiar.org

RÉSUMÉ : Connaître l'évapotranspiration (ET) est très important en matière de planification et de gestion des ressources en eau. À cet effet, plusieurs formules ont été développées pour son estimation. Parmi ces méthodes, celle de PENMAN-MONTEITH est recommandée par la FAO comme modèle de référence du fait de sa performance sous différentes conditions climatiques. Cependant l'application de cette méthode peut être difficile dans certains pays, surtout ceux en voie de développement, où l'accès aux données climatiques est parfois limité. L'une des alternatives est alors d'utiliser des méthodes intégrant moins de variables climatiques. L'objectif de ce travail est d'évaluer des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration, avant de caler et valider les deux meilleures. Pour ce faire, les données de variables climatiques journalières (Tmax, Tmin, Rs, HRmax, HRmin et u2) de huit stations sur la période 1998-2012 ont été utilisées. L'évaluation des méthodes testées s'est faite en comparant, à l'aide de différents paramètres statistiques, les valeurs qu'elles ont fournies à l'ET0 estimée par la méthode de PENMAN-MONTEITH. Les résultats obtenus montrent que les modèles de H.L. PENMAN (1963), de W. ABTEW (1996), de J.D. VALIANTZAS 1 et 3 (2012-a, 2012-b) et de G.H. HARGREAVES (1975) donnent les meilleurs résultats. Parmi ces cinq méthodes, les deux meilleures ont été retenues pour le calage et la validation. Après calage, la méthode de PENMAN fournit logiquement les estimations les plus proches de l'évapotranspiration de référence, devant celle d'ABTEW.

MOTS CLÉS : évapotranspiration, méthode de Penman-Monteith, calage, validation, Burkina Faso.

ABSTRACT : Knowledge of evapotranspiration (ET) is very important for water resources planning and management. Several methods have been developed to estimate ET. Among them the PENMAN-MONTEITH method is recommended by the Food and Agriculture Organization as a reference method. However, its use is difficult in some areas particularly in developing countries where climate data are not always available. One of the alternatives is then to use methods integrating fewer climatic variables. This study aims to evaluate alternative evapotranspiration methods and to calibrate and validate the two best ones. Daily climate data (Tmax, Tmin, Sr, RHmax, RHmin and u2) of eight stations from 1998 to 2012 were used. Each of the twenty models was compared to evaluate ET0 estimated by the PENMAN-MONTEITH by determining different statistical indices. The results show that the methods of H.L. PENMAN (1963), W. ABTEW (1996), J.D. VALIANTZAS 1 and 3 (2012-a, 2012-b) and G.H. HARGREAVES (1975) have given the best estimations of the evapotranspiration. Among these five methods, the two best are retained for calibration and validation. After calibration, the PENMAN method logically provides the best estimation of reference evapotranspiration, in front of that of ABTEW.

KEY WORDS : evapotranspiration, Penman-Monteith method, calibration, validation, Burkina Faso.

I - INTRODUCTION

L'évapotranspiration (ET) est l'une des composantes du cycle hydrologique les plus difficiles à quantifier du fait de sa complexité dans le système sol-terre- plante (C.Y. XU et V.P. SINGH, 1998 ; D.K. FISHER et H.C. PRINGLE III, 2013). Son estimation est importante pour les programmes d'irrigation, la planification et la gestion des ressources en eau (C.Y. XU et V.P. SINGH, 1998 ; O.B. ADEBOYE *et al.*, 2009 ; B. BAKHTIARI, 2011 ; X. JIA *et al.*, 2013 ; M.M. HEYDARI *et al.*, 2014 ; N. NAOREM et T.K. DEVI, 2014 ; K. DJAMAN *et al.*, 2015). L'évapotranspiration peut être estimée directement par des instruments de mesure, comme les lysimètres (A. MUSY et C. HUGY, 2004 ; A. MAKHLOUFI, 2010), les bacs d'évaporation (M. ROCHE, 1963 ; C. RIOU, 1975 ; OMM, 1994 ; C. COSANDEY et M. ROBINSON, 2000 ; L. IBTISSEM, 2007) ou les atmomètres (L. DIOP *et al.*, 2015). La mise en place et la gestion de ces instruments suppose un coût financier élevé et du personnel qualifié, raison pour laquelle ils sont souvent réservés aux centres de recherche (H. TABARI, 2010). Face à cette situation, de nombreuses méthodes ont été développées pour une estimation indirecte de l'évapotranspiration (R.G. ALLEN *et al.*, 1998).

Plusieurs de ces méthodes ont été testées sous différentes conditions climatiques. Parmi ces méthodes, celle de PENMAN-MONTEITH (FAO-PM) a été recommandée par la FAO comme méthode standard (R.G. ALLEN *et al.*, 1998 ; B. BAKHTIARI *et al.*, 2011 ; P. MARTI *et al.*, 2015). À cet égard, O.C. DIOUF *et al.* (2016) ont montré que la performance de la méthode FAO-PM réside dans le nombre important de variables météorologiques qu'elle intègre : température (T), radiation solaire (Ra), humidité relative (HR) et vitesse du vent (u_2). Cette méthode offre l'avantage de pouvoir être utilisée sans ajustement ou intégration d'autres variables. Cependant son application peut être compromise par l'absence de quelques variables climatiques dans certaines régions, particulièrement dans les pays en voie de développement, où l'accès aux données climatiques est parfois limité (R.G. ALLEN *et al.*, 1998), particulièrement à l'échelle journalière (A. BODIAN *et al.*, 2016). Pour pallier ce problème, des formules intégrant moins de variables climatiques ont été proposées (S. ALEXANDRIS *et al.*, 2008 ; D.K. FISHER et H.C. PRINGLE III, 2013 ; M. VALIPOUR, 2015 ; P. MARTI *et al.*, 2015 ; K. DJAMAN *et al.*, 2015).

Ces différentes méthodes sont classées par catégorie en fonction des variables climatiques qu'elles intègrent (M.M. HEYDARI *et al.*, 2014) : température, radiation, transfert de masse ou combinaison de variables. Les méthodes à base de température sont largement utilisées du fait que cette variable est la plus facile à obtenir (C.Y. XU et V.P. SINGH, 2001 ; S. SHAHIDIAN *et al.*, 2012).

La qualité des résultats obtenus par ces différentes méthodes varie en fonction des conditions climatiques. Ainsi, en étudiant huit méthodes à base de radiation en Suisse, C.Y. XU et V.P. SINGH (2000) ont noté que les méthodes d'ABTEW, de MAKKING et de PRIESTLEY-TAYLOR donnent les meilleures estimations de l'évapotranspiration de référence (ET₀). Cependant B. BAKHTIARI *et al.* (2011) ont montré que la méthode de MAKKING ne donne pas de bonnes estimations de l'ET₀ sous un climat semi-aride en Iran. K. DJAMAN *et al.* (2015) mentionnent que parmi les cinq meilleures méthodes qu'ils ont retenues à Ndiaye et à Fanaye au Sénégal, deux sont de type transfert de masse. M.M. HEYDARI *et al.* (2014) concluent, en revanche, que ces méthodes de transfert de masse ont tendance à surestimer l'ET₀ dans les régions arides. M. AHOOGHALANDARI *et al.* (2016), qui ont utilisé les méthodes combinatoires, celle de S. ALEXANDRIS *et al.* (2008), dite "Copais", et deux équations de JD. VALIANTZAS (2012-a, 2012-c), à Pilbara en Australie, sous des conditions

climatiques semi-arides. Ils ont noté que les méthodes de VALIANTZAS ont donné de bonnes performances.

Toutes ces méthodes demandent un calage afin d'adapter l'estimation de l'évapotranspiration aux conditions climatiques locales (C.Y. XU et V.P. SINGH, 2001 ; M. VALIPOUR, 2015 ; C.D. CHATZITHOMAS et S. ALEXANDRIS, 2015). À cet égard, C.Y. XU et V.P. SINGH (2001), en évaluant sept méthodes à base de température au Nord-Ouest de l'Ontario au Canada, notent qu'après calage, les méthodes de BLANEY-CRIDDLE, de HARGREAVES et de THORNTHWAITE donnent de meilleures estimations de l'ET₀. H. TABARI et P.H. TALAEE (2011) ont calé les méthodes de HARGREAVES et de PRIESTLEY-TAYLOR sous les conditions arides et humides de l'Iran et leurs résultats montrent une meilleure estimation de l'évapotranspiration de référence aussi bien en zone humide qu'en zone aride.

En Afrique de l'Ouest, plusieurs études portant sur l'évapotranspiration ont été menées, par exemple dans le delta du fleuve Sénégal où K. DJAMAN *et al.* (2016-a) ont évalué, calé, puis validé six méthodes d'estimation de l'ET₀ en utilisant les données journalières des stations de Saint-Louis et de Ndiaye. Au Sénégal aussi, O.C. DIOUF *et al.* (2016) ont évalué la méthode de L. TURC (1961) en utilisant les données annuelles de cinq stations. Au Bénin, S. DJIKOU (2006) a utilisé la méthode de PENMAN-MONTEITH pour calculer l'évapotranspiration potentielle, aux échelles horaire et journalière, sur quatre sites du haut bassin de l'Ouémé. Au Burkina Faso, cadre de la présente étude, F. TRAORE (2007) a travaillé sur les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle dans le bassin versant du Kou. Plus récemment, K. DJAMAN *et al.* (2016-b) ont utilisé les méthodes de PENMAN-MONTEITH et de J.D. VALIANTZAS (2012-a, 2012-b) pour estimer l'évapotranspiration à l'échelle du pays. Toutefois ces auteurs ont appliqué un nombre limité de méthodes. Il est donc important d'en tester davantage, relevant des différentes catégories, afin de déterminer celles qui fournissent les meilleures estimations.

II - ZONE D'ÉTUDE

Le Burkina Faso (Fig. 1) est situé entre 9°20' et 15°05' de latitude Nord et entre 5°20' de longitude Ouest et 2°05' de longitude Est. D'une superficie de 274 000 km², il est à cheval sur trois zones climatiques, les zones soudanienne, soudano-sahélienne et sahélienne (Y. DEMBELE, 2010). Les températures moyennes annuelles varient de 22 à 37°C en fonction des zones climatiques et l'humidité relative de 30 à plus de 70 %. Les températures moyennes sont maximales en mars, avril et octobre et minimales en novembre, décembre, janvier et février (M. OUEDRAGO, 2012). De la zone sahélienne à celle soudanienne, la pluviométrie moyenne annuelle passe de 600 à plus de 1 000 mm, avec des moyennes annuelles d'évapotranspiration allant de 500 à plus de 1 500 mm.

III - DONNÉES ET MÉTHODES

Pour ce travail, nous avons utilisé les données journalières recueillies sur la période 1998-2012 à huit stations climatologiques du Burkina Faso. Elles proviennent de la base de données d'AfricaRice. Le tableau I présente les moyennes sur la période d'étude des différentes variables climatiques considérées.

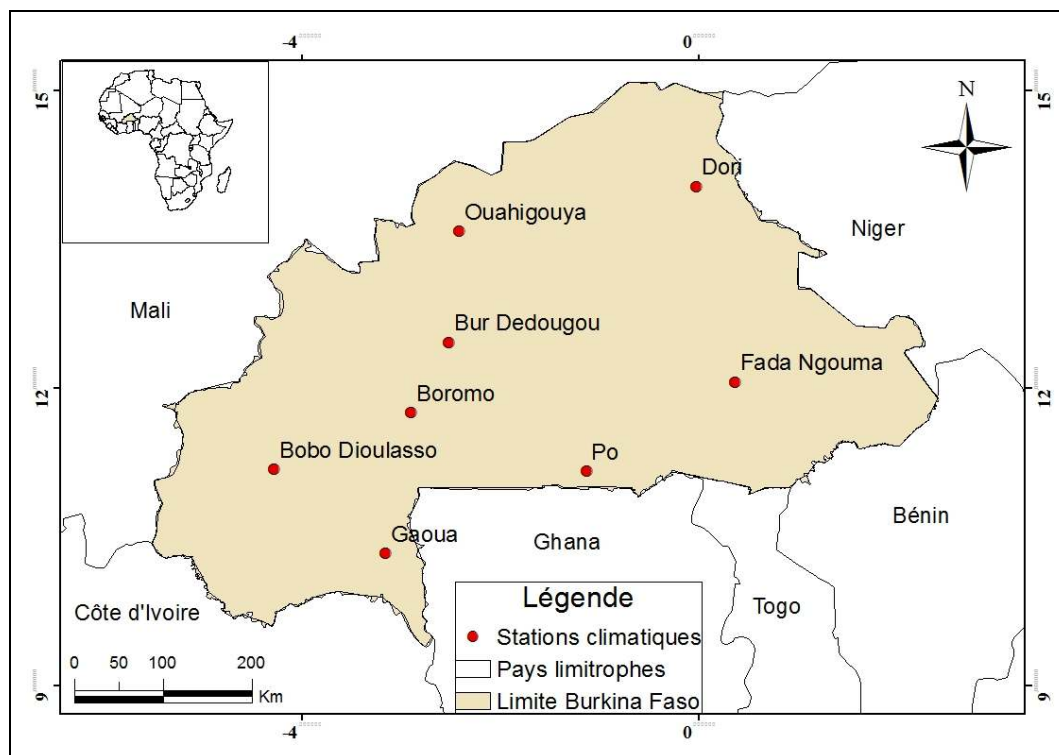


Figure 1 - Localisation de la zone d'étude et des stations climatiques retenues.

Tableau I - Coordonnées géographiques et moyennes des variables climatiques des huit stations (période 1998-2012).

Stations	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	HRmax (%)	HRmin (%)	u2 (m/s)	Rs (MJ/m ²)	P (mm)
Bobo Dioulasso	11,17	-4,32	445	33,7	22,6	67,1	37,6	1,7	20,7	131,6
Boromo	11,75	-2,93	243	35,5	22,6	65,1	33,3	0,6	20,8	252,5
Bur Dédougou	12,35	-1,52	305	35,4	22,8	60,2	31,5	1,5	21,1	142,2
Dori	14,03	-0,03	288	37,2	23,0	53,2	25,7	0,6	22,5	146,2
Fada Ngouma	12,03	0,37	294	35,51	22,8	62,5	43,2	0,7	21,0	313,8
Gaoua	10,33	-3,18	339	34,4	22,1	72,8	38,5	0,9	20,3	446,3
Ouahigouya	13,57	0,20	315	36,0	23,5	51,1	26,8	1,1	21,5	204,0
Po	11,15	-1,15	322	34,8	22,8	63,2	33,9	0,7	20,7	403,3

Lat. : latitude. Long. : longitude. Alt. : altitude. Tmax : moyenne des températures maximales journalières. Tmin : moyenne des températures minimales journalières. HRmax : moyenne des humidités relatives maximales journalières. HRmin : moyenne des humidités relatives minimales journalières. u2 : moyenne des vitesses du vent mesurées à 2 m de hauteur. Rs : moyenne des valeurs mesurées du rayonnement solaire. P : pluviométrie annuelle moyenne.

1) Modèles utilisés

La méthodologie adoptée consiste à comparer les valeurs de l'évapotranspiration estimées par chacune des méthodes que nous avons testées avec celles fournies par la méthode référence de PENMANN-MONTEITH.

a. Méthode de PENMANN-MONTEITH (FAO-PM)

Cette méthode estime l'évapotranspiration d'une surface caractérisée par une végétation courte et verdoyante (gazon), convenablement alimentée en eau, de hauteur uniforme (0,12 m), d'un albédo de 0,23 et d'une résistance de surface (au transfert de vapeur d'eau) de 70 s/m (R.G. ALLEN *et al.*, 1998 ; S. ALEXANDRIS *et al.*, 2008 ; M. VALIPOUR, 2015 ; K. DJAMAN *et al.*, 2015 ; C.D. CHATZITHOMAS et S. ALEXANDRIS, 2015). Sa formulation est la suivante :

$$ET0 = \frac{[0,408\Delta \times (Rn - G)] + [\gamma(900 / (T + 273)) \times u2(es - ea)]}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u2)} \quad (1)$$

où $ET0$ est l'évapotranspiration de référence (en mm/jour), Rn le rayonnement global (en MJ m²/jour), G le flux de chaleur du sol (en MJ/m²/jour), T la température moyenne journalière de l'air à une hauteur de 2 m (en °C), $u2$ la vitesse du vent à une hauteur de 2 m (en m/s), es la pression de vapeur saturante (en kPa), ea la pression de vapeur à la température T (en kPa), Δ la pente de la courbe de la pression de vapeur saturante (en kPa/°C), γ la constante psychrométrique (en kPa/°C) et 900 une constante pour un pas de temps journalier.

b. Les méthodes testées

Des quarante méthodes qui ont été soumises à nos critères d'évaluation, vingt ont été sélectionnées pour figurer dans cette étude. Il s'agit : 1/ de méthodes à base de température, 2/ de méthodes à base de radiation, 3/ de méthodes de transfert de masse et 4/ de méthodes dites combinatoires c'est-à-dire qui associent l'approche aérodynamique et celle du bilan d'énergie. Elles sont présentées dans le tableau II.

2) Critères d'évaluation

Les critères d'évaluation utilisés sont l'écart quadratique moyen (EQM), l'erreur moyenne des biais (EMB), le pourcentage d'erreur (PE) et le coefficient de détermination (R^2). L'EQM détermine l'erreur moyenne qui existe entre deux variables ; plus elle est faible, meilleur est le résultat (S. ALEXANDRIS *et al.*, 2008). L'EMB permet de juger de la sous-estimation ou de la surestimation d'une méthode par rapport à la référence. Le PE détermine les erreurs en valeurs relatives. Le R^2 , quant à lui, doit être le plus proche possible de 1 pour que le résultat soit satisfaisant. La formulation mathématique de chaque indice est donnée ci-après :

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET0_{est} - ET0_{PM})^2 \quad (2)$$

$$EMB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET0_{est} - ET0_{PM}) \quad (3)$$

$$PE = \left| \frac{ET0_{est} - ET0_{PM}}{ET0_{PM}} \right| \times 100 \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(ET0_{est} - \overline{ET0_{PM}})^2]}{\sum_{i=1}^n [(ET0_{PM} - \overline{ET0_{PM}})^2]} \quad (5)$$

où $ET0_{est}$ est l'évapotranspiration estimée par la méthode testée, $ET0_{PM}$ l'évapotranspiration

Tableau II - Caractéristiques des vingt méthodes retenues.

Catégorie	Référence bibliographique	Formulation
Température	G.H. HARGREAVES (1975)	$ET0 = 0,035Rs \times (Ta + 17,8) \times 0,408$
	S. TRAJKOVIC (2007)	$ET0 = 0,0023Ra \times (Ta + 17,8) \times (Tmax - Tmin)^{0,5} \times 0,408$
	G. RAVAZZANI <i>et al.</i> (2012)	$ET0 = (0,00022z + 0,817) \times 0,0023Ra \times (Ta + 17,8) \times (Tmax - Tmin)^{0,5} \times 0,408$
	GF. MAKING (1957)	$ET0 = 0,61 \times (\Delta / (\Delta + \gamma)) \times (Rs / \lambda) - 0,12$
Radiation	M.E. JENSEN et H.R. HAISE (1963)	$ET0 = [CT \times (Ta - Tx) \times Rs] / \lambda$
	C.H.B. PRIESTLEY et R.J. TAYLOR (1972)	$ET0 = \alpha \times [(\Delta / (\Delta + \gamma)) \times (Rn / \lambda)]$
	W. ABTEW (1996)	$ET0 = 0,408 \times 0,01789Rs \times Tmax$
	S. IRMAK (2003-a)	$ET0 = 0,149Rs + 0,079Ta - 0,611$
	S. IRMAK (2003-b)	$ET0 = 0,174Rs + 0,0353Ta - 0,642$
	S. IRMAK (2003-c)	$ET0 = 0,156Rs - 0,0112Tmax + 0,0733Tmin - 0,478$
	L. OUDIN (2005)	$ET0 = Rs \times [(Ta + 5) / 100]$
	J. DALTON (1802)	$ET0 = (0,07223u2 + 0,3648) \times (es - ea)$
Transfert de masse	W. TRABERT (1896)	$ET0 = 0,3075 + \sqrt{u2} \times (es - ea)$
	F. ALBRECHT (1950)	$ET0 = (0,297 \times u2 \times (es - ea) + 0,1005$
	W. MAHINGER (1970)	$ET0 = 0,15072 \times \sqrt{[3,6u2 \times (es - ea)]}$
	WMO (1996)	$ET0 = [0,0934u2 \times (es - ea)] + 0,1298$
	H.L. PENMAN (1963)	$ET0 = [(((\Delta / (\Delta + \gamma)) \times (Rn - G)) + ((\gamma / (\Delta + \gamma)) \times 6,43 \times ((1 + (0,53u2 \times (es - ea)) / \lambda) \times 0,408$
Combinatoires	J.D. VALIANTZAS (2012-a)	$ET0 = [0,0393Rs \times \sqrt{(Ta + 9,5)}] - 2,4(Rs/Ra)^2 - [0,024(Ta + 20)(1 - (HR/100))] + [0,1W(Ta + 20)(1 - (HR/100))]$
	J.D. VALIANTZAS (2012-b)	$ET0 = [0,0393Rs \times \sqrt{(Ta + 9,5)}] - (0,19Rs^{0,6} \phi^{0,15}) + [0,078(Ta + 20)(1 - (HR/100))]$
	J.D. VALIANTZAS (2012-c)	$ET0 = [0,0393Rs \times \sqrt{(Ta + 9,5)}] - (0,19Rs^{0,6} \phi^{0,15}) + [0,0061(Ta + 20)(1,12Ta - Tmin - 2)^{0,7}]$

$ET0$: évapotranspiration de référence (mm/j). Ta : température moyenne de l'air (°C). $Tmax$ et $Tmin$: températures maximale et minimale de l'air (°C). Rs : radiation solaire (MJ/m²/j). Ra : radiation extraterrestre (MJ/m²/j). z : altitude en m. Δ : pente de la courbe de pression de vapeur saturante (KPa °C). γ : constante psychrométrique (KPa °C). CT et Tx : valeurs constantes (0,025 et -3, respectivement). λ : chaleur latente de vaporisation (MJ/m²/j). Rn : radiation nette (MJ/m²/j). $u2$: vitesse du vent (m/s). es : pression de vapeur saturante (KPa). ea : pression de vapeur actuelle (KPa). $(es - ea)$: déficit de saturation. G : flux de chaleur du sol (MJ/m²/j). HR : humidité relative (%). W : constante, fonction du vent ($W=0,78$ si $HR>65\%$ et $W=1,067$ si $HR\leq 65\%$). ϕ : latitude (avec pour unité le radian).

estimée par la méthode de PENMAN-MONTEITH, $ET0_{PM}$ la moyenne des valeurs trouvées par la méthode de PENMAN-MONTEITH et n est le nombre total de termes de la série de données de la période 1998-2012.

Les deux meilleures méthodes ont ensuite été calées puis validées.

3) Procédure de calage

Le principe du calage consiste à faire tendre la pente de la droite de régression vers 1 et l'interception vers 0. Pour ce faire, les 15 ans de données journalières sont divisés en deux : les 2/3 des données (1998-2008) sont utilisées pour le calage et les données de la période restante (2009-2012) sont utilisées pour la validation. Pour ce qui est du calage, une optimisation a été faite avec l'outil "solveur" disponible sous Excel, afin de minimiser l'erreur quadratique moyenne (EQM) des méthodes à caler. Cette optimisation a permis d'avoir de nouvelles constantes qui sont utilisées pour la validation.

IV - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus sont présentés par type de méthode.

1) Les méthodes basées sur la température (Tab. III)

Parmi ces méthodes, celle de HARGREAVES ($ET0_{HG}$) donne les meilleurs résultats, avec des coefficients de détermination entre 0,59 et 0,77. L'écart entre $ET0_{HG}$ et $ET0_{PM}$ varie de 0,71 à 1,48 mm/j et le pourcentage d'erreur entre 10 et 30 %. Ces résultats sont en accord avec ceux de H. TABARI (2010) qui montrent que la méthode de HARGREAVES donne les meilleures estimations de l' $ET0$ dans toutes les stations situées dans le domaine semi-aride en Iran. N. NAOREM et T.K. DEVI (2004), dans leur étude réalisée à Imphal (Inde), vont dans le même sens en notant que la méthode de HARGREAVES est la meilleure méthode parmi les 10 modèles qu'ils ont évalués. Cependant, malgré la performance de cette méthode, les valeurs de l'erreur moyenne des biais (EMB) montrent qu'elle sous-estime l' $ET0$ de 0,04 mm/j à la station de Bobo Dioulasso et la surestime de 0,05 à 1,29 mm/j pour le reste des stations.

Contrairement à la précédente, les méthodes de TRAJKOVIC et de RAVAZZANI *et al.* présentent des R^2 faibles, qui varient entre 0,26 et 0,47. Les erreurs quadratiques moyennes sont élevées (entre 0,73 et 1,42 mm/j) ainsi que les pourcentages d'erreur (entre 14 et 30 %). L'analyse des valeurs de l'erreur moyenne des biais (EMB) montre que ces méthodes sous-estiment l' $ET0$ aux stations de Bobo Dioulasso (-0,30 et -0,73 mm/j, respectivement) et de Bur Dédougou (-0,03 et -0,65 mm/j). La méthode de RAVAZZANI *et al.* sous-estime également l' $ET0$ à la station de Ouahigouya. Les deux méthodes surestiment l' $ET0$ pour le reste des stations. La surestimation de l' $ET0$ par les méthodes de TRAJKOVIC et de RAVAZZANI *et al.*, notée dans cette étude, a été soulignée aussi par K. DJAMAN *et al.* (2015) à Ndiaye et à Fanaye (Sénégal).

Tableau III - Comparaison entre les méthodes à base de température et celle de PENMAN-MONTEITH.

Indice	Équation	BD	BR	BU	DR	FG	GA	OA	PO
Pente	HARGREAVES	0,75	1,03	0,83	0,93	1,06	1,04	0,74	1,03
	TRAJKOVIC	0,45	0,52	0,48	0,44	0,48	0,47	0,43	0,49
	RAVAZZANI	0,41	0,46	0,42	0,39	0,43	0,42	0,38	0,43
R ²	HARGREAVES	0,66	0,68	0,65	0,68	0,77	0,76	0,74	0,71
	TRAJKOVIC	0,47	0,32	0,42	0,26	0,31	0,31	0,43	0,34
	RAVAZZANI	0,47	0,32	0,42	0,26	0,31	0,31	0,38	0,34
EQM (mm/j)	HARGREAVES	0,71	1,24	0,73	1,48	1,06	0,86	0,98	1,06
	TRAJKOVIC	0,92	1,42	0,89	1,54	1,23	1,10	1,05	1,12
	RAVAZZANI	1,14	0,90	1,10	1,11	0,88	0,82	1,05	0,80
EMB (mm/j)	HARGREAVES	-0,04	1,07	0,05	1,28	0,89	0,66	0,49	0,87
	TRAJKOVIC	-0,30	1,16	-0,03	1,11	0,85	0,73	0,30	0,79
	RAVAZZANI	-0,73	0,45	-0,65	0,41	0,21	0,16	-0,33	0,20
PE (%)	HARGREAVES	10	26	11	30	21	17	17	21
	TRAJKOVIC	14	32	14	32	26	22	18	23
	RAVAZZANI	16	19	16	22	18	15	16	15

BD : Bobo Dioulasso. BR : Boromo. BU : Bur Dédougou. DR : Dori. FG : Fada Ngouma. GA : Gaoua. OA : Ouahigouya. PO : Po.

R² : coefficient de détermination. EQM : écart quadratique moyen. EMB : écart moyen des biais. PE : pourcentage d'erreur.

2) Les méthodes basées sur la radiation (Tab. IV)

Dans ce cas, c'est la méthode d'ABTEW qui donne les meilleures estimations de l'ET₀ (R² de 0,58 à 0,76). Les meilleurs résultats de cette méthode sont observés aux stations de Bobo Dioulasso, Gaoua, Boromo, Bur Dédougou, Fada Ngourma et Po. Les coefficients de détermination des autres modèles varient de 0,12 (méthode de PRIESTLEY-TAYLOR) à 0,78 (méthodes d'IRMAK et d'LOUDIN). Les erreurs quadratiques moyennes (EQM) pour les équations de MAKING, JENSEN et HAISE, PRIESTLEY-TAYLOR, ABTEW, IRMAK varient de 0,72 à 1,83 mm/j. Les méthodes de JENSEN et HAISE et d'LOUDIN ont tendance à surestimer l'ET₀ de 1,37 à 1,60 mm/j, alors que toutes les autres méthodes sous-estiment l'évapotranspiration de référence.

Au niveau des stations de Dori et de Ouahigouya, contrairement aux stations citées ci-dessus, les meilleures estimations de l'évapotranspiration de référence sont données par la méthode de PRIESTLEY-TAYLOR, avec des R² de 0,55 et 0,67 et des EQM de 0,74 et 1,08 mm/j respectivement. Les valeurs d'EMB montrent qu'à l'exception de la méthode de MAKING et de deux des formes de la formule d'IRMAK (b et c), qui sous-estiment l'ET₀, toutes les autres méthodes à base de radiation la surestiment.

Il ressort ainsi que, parmi les méthodes à base de radiation, celle d'ABTEW donne les meilleures estimations de l'ET₀ en zones soudanienne et soudano-sahélienne, alors que celle de PRIESTLEY-TAYLOR est la plus satisfaisante en zone sahélienne. La méthode d'LOUDIN, qui surestime partout l'évapotranspiration de référence (jusqu'à 3,28 mm) et dont les PE sont les plus élevés (de 32 à 71 % en fonction du domaine climatique), se révèle, quant à elle, la moins performante pour le calcul de l'ET₀.

Tableau IV - Comparaison entre les méthodes à base de radiation et celle de PENMAN-MONTEITH.

Indice	Équation	BD	BR	BU	DR	FG	GA	OA	PO
Pente	MAKKING	0,52	0,73	0,70	0,56	0,73	0,72	0,59	0,48
	JENSEN et HAISE	1,05	1,44	0,47	1,20	0,91	1,44	1,39	0,61
	PRIESTLEY-TAYLOR	0,30	0,77	0,91	0,47	1,11	0,77	0,90	0,79
	ABTEW	0,86	1,10	1,07	0,93	1,10	1,10	0,94	0,75
	IRMAK (a)	0,47	0,64	0,63	0,51	0,64	0,63	0,54	0,44
	IRMAK (b)	0,46	0,65	0,61	0,49	0,64	0,63	0,50	0,41
	IRMAK (c)	0,40	0,60	0,61	0,46	0,62	0,60	0,57	0,43
	LOUDIN	1,06	1,45	1,47	1,20	1,50	1,45	1,38	1,08
R ²	MAKKING	0,63	0,72	0,64	0,62	0,75	0,69	0,63	0,54
	JENSEN et HAISE	0,68	0,79	0,71	0,66	0,56	0,72	0,70	0,41
	PRIESTLEY-TAYLOR	0,12	0,53	0,61	0,22	0,70	0,44	0,67	0,55
	ABTEW	0,70	0,67	0,58	0,66	0,76	0,65	0,55	0,56
	IRMAK (a)	0,66	0,77	0,69	0,65	0,78	0,71	0,68	0,59
	IRMAK (b)	0,62	0,71	0,62	0,61	0,73	0,68	0,62	0,53
	IRMAK (c)	0,59	0,78	0,75	0,59	0,78	0,72	0,75	0,60
	LOUDIN	0,67	0,78	0,70	0,66	0,78	0,72	0,69	0,61
EQM (mm/j)	MAKKING	1,55	0,65	1,55	0,77	0,73	0,82	1,32	0,73
	JENSEN et HAISE	1,62	2,75	1,89	3,25	0,83	2,20	1,25	2,52
	PRIESTLEY-TAYLOR	1,48	0,70	1,49	0,74	1,17	0,72	1,08	0,84
	ABTEW	0,72	1,40	0,78	1,76	1,51	0,96	1,31	1,12
	IRMAK (a)	0,97	0,69	0,94	0,80	0,56	0,50	0,87	0,58
	IRMAK (b)	1,56	0,65	1,57	0,82	0,75	0,81	1,36	0,73
	IRMAK (c)	1,52	0,57	1,55	0,74	0,71	0,76	1,29	0,68
	LOUDIN	1,83	2,97	2,09	3,47	2,82	2,42	2,60	2,74
EMB (mm/j)	MAKKING	-1,36	-0,33	-1,38	-0,31	-0,53	-0,64	-1,00	-0,50
	JENSEN et HAISE	1,37	2,58	1,60	3,05	0,19	2,04	-0,68	2,35
	PRIESTLEY-TAYLOR	-0,74	0,23	-0,89	0,03	0,91	0,06	0,53	0,03
	ABTEW	-0,18	1,11	0,07	1,46	1,37	0,63	0,97	0,83
	IRMAK (a)	-0,61	0,46	-0,61	0,42	0,25	0,13	-0,23	0,27
	IRMAK (b)	-1,35	-0,32	-1,38	-0,36	-0,53	-0,62	-1,02	-0,50
	IRMAK (c)	-1,28	-0,30	-1,35	-0,39	-0,50	-0,59	-0,98	-0,44
	LOUDIN	1,60	2,80	1,83	3,28	2,66	2,27	2,36	2,58
PE (%)	MAKKING	25	12	25	13	13	15	20	13
	JENSEN et HAISE	28	60	31	66	16	45	19	53
	PRIESTLEY-TAYLOR	19	14	21	13	22	13	18	15
	ABTEW	10	28	12	35	31	17	24	21
	IRMAK (a)	12	15	12	16	11	9	12	11
	IRMAK (b)	24	12	24	13	13	15	20	12
	IRMAK (c)	22	9	23	11	11	13	19	10
	LOUDIN	32	65	35	71	58	50	48	58

BD : Bobo Dioulasso. BR : Boromo. BU : Bur Dédougou. DR : Dori. FG : Fada Ngouma. GA : Gaoua. OA : Ouahigouya. PO : Po. Pour R², EQM, EMB et PE, voir tableau III.

Ces résultats sont en phase avec ceux de C.Y. XU et V.P. SINGH (2000) et de S. ALEXANDRIS *et al.* (2008). Les premiers, ont comparé l'ET₀ de cinq méthodes à base de radiation avec l'évaporation en bac et ont montré que la méthode d'ABTEW (1996) offre de bonnes perfor-

mances. S. ALEXANDRIS *et al.* (2008), quant à eux, en évaluant les performances de six méthodes à base de radiation en Serbie centrale, ont trouvé que celle de PRIESTLEY-TAYLOR vient au deuxième rang après leur propre méthode (la "Copais"). Toutefois S. BOUKHLASSA et S. PARÉ (2006) notent que la méthode de PRIESTLEY-TAYLOR sous-estime l'ET₀ par rapport à la méthode de PENMAN-MONTEITH dans la région de Tafilalet dans le Sud du Maroc. Par ailleurs, H. TABARI (2010), qui a évalué les méthodes de TURC (non retenue pour la présente étude), MAKKING, PRIESTLEY-TAYLOR et HARGREAVES dans quatre domaines climatiques de l'Iran, met en évidence une sous-estimation systématique de l'ET₀ par la méthode de MAKKING, ce qui est en contradiction avec les résultats de S. ALEXANDRIS *et al.* (2008), M.M. HEYDARI *et al.* (2014) et K. DJAMAN *et al.* (2015).

3) Les méthodes de transfert de masse (Tab. V)

Le tableau V montre que, parmi les vingt méthodes, les méthodes de transfert de masse sont les moins robustes pour le calcul de l'ET₀, avec des coefficients de détermination allant de 0,15 à 0,70. Les pourcentages d'erreur varient de 29 à 61 %. Globalement, ces méthodes sous-estiment l'évapotranspiration.

Tableau V - Comparaison entre les méthodes de transfert de masse et celle de PENMAN-MONTEITH.

Indice	Équation	BD	BR	BU	DR	FG	GA	OA	PO
Pente	DALTON	1,51	0,80	1,41	0,74	0,82	0,98	0,98	0,99
	TRABERT	1,34	0,79	1,27	0,85	0,77	0,89	1,08	0,93
	ALBRECHT	1,39	1,06	2,11	1,22	1,12	1,34	1,90	1,35
	WMO	0,99	0,49	0,92	0,51	0,51	0,61	0,75	0,61
	MAHRINGER	1,25	0,74	1,18	0,79	0,71	0,83	1,01	0,86
R ²	DALTON	0,64	0,15	0,52	0,19	0,15	0,28	0,31	0,20
	TRABERT	0,70	0,29	0,62	0,40	0,26	0,42	0,53	0,32
	ALBRECHT	0,62	0,32	0,67	0,44	0,31	0,47	0,63	0,36
	WMO	0,71	0,23	0,62	0,32	0,22	0,39	0,51	0,29
	MAHRINGER	0,70	0,29	0,62	0,40	0,26	0,42	0,53	0,32
EQM (mm/j)	DALTON	1,80	1,75	1,71	1,87	2,11	1,71	1,85	1,86
	TRABERT	2,13	2,35	1,93	2,11	2,56	2,33	1,82	2,29
	ALBRECHT	2,21	2,09	2,16	1,88	2,31	1,96	2,15	2,11
	WMO	2,87	2,63	2,73	2,51	2,94	2,81	2,50	2,68
	MAHRINGER	2,30	2,46	2,10	2,25	2,67	2,46	1,97	2,40
EMB (mm/j)	DALTON	-1,02	-0,19	-0,41	0,50	-0,71	-0,84	0,26	-0,31
	TRABERT	-1,81	-2,05	-1,51	-1,73	-2,20	-2,10	-1,30	-1,92
	ALBRECHT	0,04	-1,54	0,30	-1,00	-1,58	-1,40	0,19	-1,27
	WMO	-2,76	-2,45	-2,59	-2,30	-2,73	-2,69	-2,30	-2,49
	MAHRINGER	-2,06	-2,21	-1,78	-1,93	-2,37	-2,27	-1,57	-2,10
PE(%)	DALTON	32	37	29	37	41	34	33	38
	TRABERT	38	49	31	38	49	48	29	45
	ALBRECHT	35	41	33	31	42	39	32	40
	WMO	55	57	49	49	60	61	45	56
	MAHRINGER	42	52	35	42	53	52	32	48

BD : Bobo Dioulasso. BR : Boromo. BU : Bur Dédougou. DR : Dori. FG : Fada Ngouma. GA : Gaoua. OA : Ouahigouya. PO : Po. Pour R², EQM, EMB et PE, voir tableau III.

La faible performance des méthodes de transfert de masse a été soulignée par M.M. HEYDARI *et al.* (2014), qui ont appliqué 38 méthodes pour estimer l'évapotranspiration sous climat aride en Iran. Néanmoins les études de K. DJAMAN *et al.* (2015), à Fanaye et à Ndiaye au Sénégal, ont débouché sur des résultats différents. En effet, pour ces auteurs, les méthodes de transfert de masse de TRABERT et de MAHRINGER sont relativement performantes sous des conditions climatiques sahéliennes. Cette contradiction s'explique par la vitesse du vent, dont la simple variation peut influencer significativement l'évapotranspiration dans les climats arides et semi-arides. La sous-estimation de l'ET₀ par ces méthodes a été évoquée par H. TABARI et P.H. TALAEE (2011), alors que sa surestimation par l'équation d'ALBRECHT a été soulignée par M.M. HEYDARI *et al.* (2014).

4) Méthodes combinatoires (Tab. VI)

Les résultats obtenus pour les méthodes combinatoires montrent que celle de PENMAN donne les meilleurs résultats, avec un coefficient de détermination variant de 0,77 à 0,94 et des erreurs quadratiques moyennes faibles (0,33 à 0,60 mm/j). Les valeurs de l'EMB indiquent que cette méthode sous-estime l'ET₀ aux stations de Bobo Dioulasso, Bur Dédougou et Ouahigouya. Les méthodes de VALIANTZAS 1 et 3 (R^2 de 0,54 à 0,75) donnent de meilleures estimations de l'ET₀ que celle de VALIANTZAS 2 (R^2 de 0,37 à 0,77). Cette dernière surestime l'ET₀ de 0,58 à 2,26 mm/j et ses PE varient de 13 à 52 %. Les résultats de K. DJAMAN *et al.* (2016-b) au Burkina Faso sont en désaccord avec notre étude, la méthode de VALIANTZAS 2 ayant donné de meilleures estimations de l'ET₀ que la VALIANTZAS 1.

Tableau VI - Comparaison entre les méthodes combinatoires et celle de PENMAN-MONTEITH.

Indice	Équation	BD	BR	BU	DR	FG	GA	OA	PO
Pente	PENMAN	0,70	0,92	0,80	0,96	0,93	0,87	0,89	0,87
	VALIANTZAS 1	0,69	0,90	0,74	0,77	0,93	0,94	0,63	0,92
	VALIANTZAS 2	1,13	0,98	1,07	0,77	1,04	1,14	0,72	1,11
	VALIANTZAS 3	0,72	0,89	0,75	0,73	0,92	0,93	0,62	0,92
R^2	PENMAN	0,77	0,90	0,78	0,94	0,88	0,88	0,88	0,85
	VALIANTZAS 1	0,66	0,64	0,65	0,63	0,75	0,73	0,55	0,69
	VALIANTZAS 2	0,77	0,37	0,68	0,39	0,46	0,56	0,39	0,46
	VALIANTZAS 3	0,69	0,58	0,66	0,56	0,71	0,68	0,54	0,66
EQM (mm/j)	PENMAN	0,60	0,36	0,59	0,33	0,41	0,37	0,45	0,39
	VALIANTZAS 1	0,74	1,05	0,72	1,23	0,84	0,72	0,89	0,88
	VALIANTZAS 2	0,95	2,14	1,23	2,53	1,85	1,53	1,96	1,98
	VALIANTZAS 3	0,68	1,31	0,70	1,51	1,08	0,94	0,98	1,07
EMB (mm/j)	PENMAN	-0,12	0,22	-0,21	0,13	0,21	0,16	-0,12	0,14
	VALIANTZAS 1	-0,23	0,84	-0,18	0,99	0,64	0,46	0,24	0,66
	VALIANTZAS 2	0,58	1,79	0,88	2,26	1,46	1,19	1,56	1,64
	VALIANTZAS 3	-0,08	1,11	0,05	1,27	0,91	0,71	0,46	0,88
PE (%)	PENMAN	9	8	9	6	8	8	7	8
	VALIANTZAS 1	10	22	10	25	16	14	14	17
	VALIANTZAS 2	13	43	18	52	33	27	34	37
	VALIANTZAS 3	9	28	10	31	21	18	17	21

BD : Bobo Dioulasso. BR : Boromo. BU : Bur Dédougou. DR : Dori. FG : Fada Ngouma. GA : Gaoua. OA : Ouahigouya. PO : Po. Pour R^2 , EQM, EMB et PE, voir tableau III.

De toutes les méthodes combinatoires, celle de PENMAN fournit les meilleures estimations de l'ET₀ pour toutes les stations. Cette méthode est également la plus performante des vingt méthodes évaluées. Cette performance de la méthode de PENMAN a été déjà soulignée par K. DJAMAN *et al.* (2015) au Sénégal.

V - CALAGE ET VALIDATION

La comparaison de l'évapotranspiration PENMAN-MONTEITH avec différentes méthodes à base de température, de radiation, de transfert de masse ou combinatoires ayant montré que les méthodes de PENMAN et d'ABTEW donnent les meilleurs résultats, le tableau VII établit les nouvelles constantes de ces deux méthodes après calage. Les résultats obtenus par la validation sont présentés à la figure 2 et au tableau VIII.

Tableau VII - Les méthodes de PENMAN et d'ABTEW avant et après calage.

Méthode		Formulation
ABTEW	Avant	$ET_0 = 0,01789R_s \times T_{max} \times 0,408$
	Après	$ET_0 = 0,016949R_s \times T_{max} \times 0,408$
PENMAN	Avant	$ET_0 = [((\Delta/(\Delta + \gamma) \times (R_n - G)) + ((\gamma/(\Delta + \gamma)) \times 6,43 \times ((1 + (0,53u_2 \times (es - ea)))/\lambda) \times 0,408$
	Après	$ET_0 = [((\Delta/(\Delta + \gamma) \times (R_n - G)) + ((\gamma/(\Delta + \gamma)) \times 0,1095 \times ((1 + (53,792u_2 \times (es - ea)))/\lambda) \times 0,408$

Après calage, les pentes de la méthode de PENMAN deviennent proches de 1 et les coefficients de détermination varient de 0,94 à 0,98. Les erreurs quadratiques moyennes (EQM) sont faibles (0,16 à 0,41 mm/j). Il en est de même des pourcentages d'erreur, qui se situent entre 3 et 5 % seulement. Les erreurs moyennes des biais indiquent une très légère surestimation de l'ET₀, de 0,02 à 0,13 mm/j en fonction des stations.

Dans le cas de la méthode d'ABTEW, les coefficients de détermination après calage varient de 0,50 à 0,73. Cependant, appliquée à la zone sahélienne, la méthode d'ABTEW continue de donner de faibles performances par rapport aux autres zones climatiques. Cela peut être expliqué par le fait que cette méthode a été développée en Floride, où les taux d'évapotranspiration sont plus sensibles à la variation de la radiation solaire (W. ABTEW *et al.*, 2003).

VI - CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif d'évaluer vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration de référence (ET₀) au Burkina Faso et de caler et valider les deux meilleures méthodes. Pour atteindre cet objectif, les ET₀ calculées par les méthodes testées ont été comparées à celles fournies par la méthode de PENMAN-MONTEITH, recommandée par la FAO, de sorte d'en évaluer les performances.

Comparées à l'ET₀ de PENMAN-MONTEITH, les résultats obtenus montrent que les

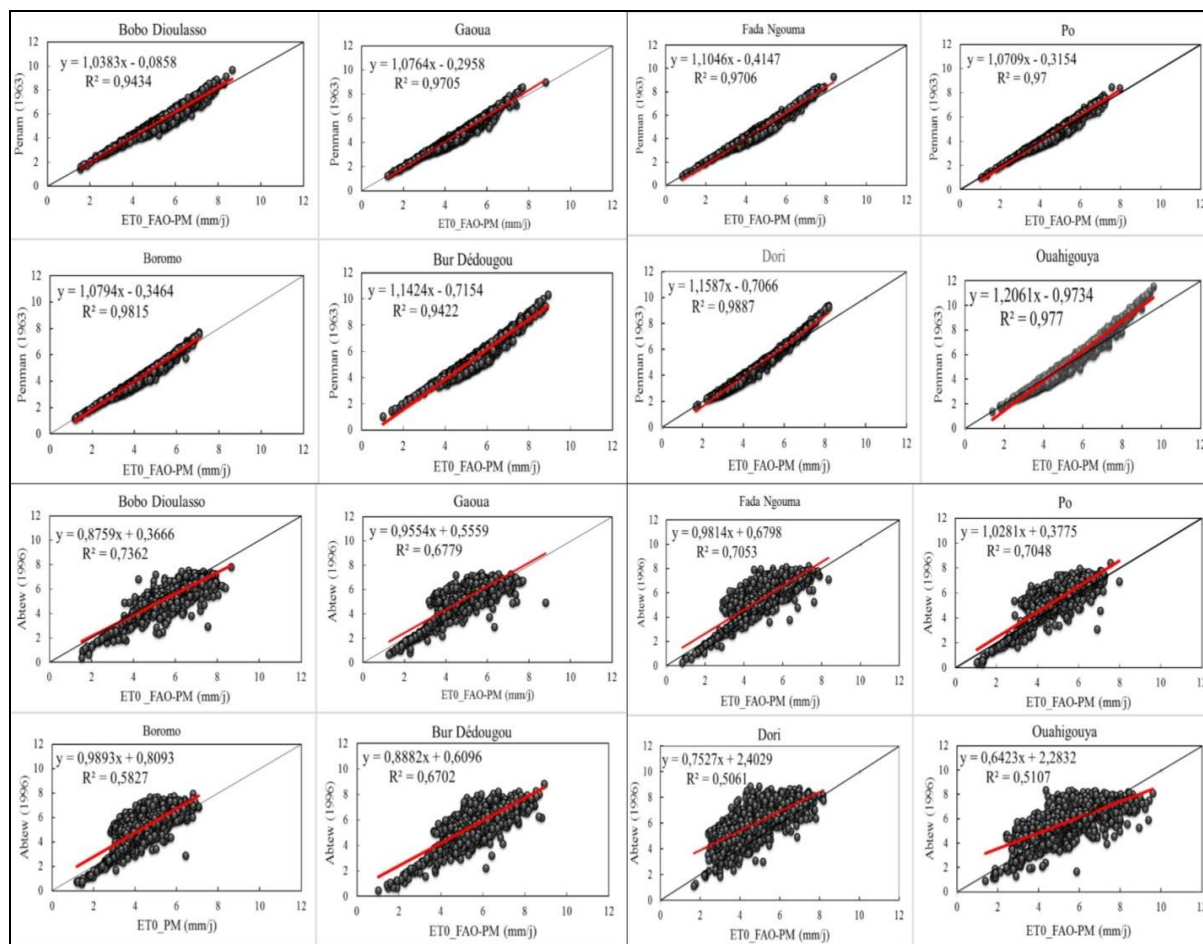


Figure 2 - Relations entre les valeurs de l'ET0 estimées par la méthode de PENMAN-MONTEITH (en abscisse) et celles estimées par les équations après calage (en ordonnée).

Tableau VIII - Comparaison des performances des méthodes de PENMAN et d'ABTEW après calage.

Zone climatique		Soudanienne		Soudano-sahélienne			Sahélienne		
Indice	Méthode	BD	GA	BR	BU	FG	PO	DR	OA
EQM (mm/j)	PENMAN	0,32	0,32	0,22	0,16	0,37	0,26	0,21	0,32
	ABTEW	0,68	0,77	1,11	0,73	0,91	0,85	0,68	1,09
EMB (mm/j)	PENMAN	0,12	0,12	0,06	0,01	0,08	0,10	0,02	0,12
	ABTEW	-0,29	0,35	0,76	-0,01	0,59	0,51	-0,29	0,37
PE (%)	PENMAN	5	5	4	3	5	4	3	5
	ABTEW	9	14	21	10	15	15	9	18

BD : Bobo Dioulasso. GA : Gaoua. BR : Boromo. BU : Bur Dédougou. FG : Fada Ngouma. PO : Po. DR : Dori. OA : Ouahigouya.

meilleures estimations de l'ET0 sont obtenues avec les méthodes combinatoires, et tout particulièrement avec celle de PENMAN, qui se révèle la meilleure à toutes les stations, ce qui

n'a rien d'étonnant compte-tenu du degré de filiation entre les deux méthodes. Les méthodes de VALIANZAS 1 et 3 fournissent de meilleurs résultats que la VALIANZAS 2.

Les méthodes de transfert de masse ont toutes de faibles performances. Parmi les méthodes basées sur la température, celle de HARGREAVES se révèle la plus efficace. Il en est de même de la méthode d'ABTEW pour les approches basées sur la radiation, surtout dans les zones soudanienne et soudano-sahélienne. Dans la zone sahélienne, en revanche, c'est la méthode de PRIESTLEY-TAYLOR qui fournit les meilleurs résultats.

Globalement, les méthodes de PENMAN et d'ABTEW surclassent toutes les autres. Après calage et validation, celle de PENMAN est la meilleure dans toutes les zones climatiques du Burkina Faso. Celle d'ABTEW est surtout performante dans les zones soudanienne et soudano-sahélienne.

Il convient toutefois de noter que, compte tenu de l'étendue de la zone d'étude et de ses contrastes climatiques, le nombre des stations utilisées dans cette étude s'avère insuffisant pour tirer des conclusions définitives. Un plus grand nombre de stations pourrait permettre de définir pour chaque zone climatique une méthode spécifique d'estimation de l'évapotranspiration de référence qui pourrait être utilisée quand les données nécessaires pour appliquer la méthode de PENMAN-MONTEITH, et donc aussi celle de PENMAN, ne sont pas toutes disponibles.

Remerciements : Nous sommes reconnaissants à nos réviseurs, Pierre HUBERT et un collègue resté anonyme, des conseils qu'ils nous ont prodigués. Nous sommes en outre très redevables à Claude MARTIN de l'aide qu'il nous a apportée dans la phase de finalisation du texte. Enfin, L'auteur principal remercie les responsables du centre régional d'*AfricaRice* au Sénégal qui ont accepté de l'accueillir comme stagiaire dans le cadre de son mémoire de Master II.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABTEW W. (1996) - Evapotranspiration measurement and modeling for three wetland systems in South Florida. *Water Resources Bulletin*, vol. 32, n° 3, p. 465-473.
- ABTEW W., OBEYSEKERA J., IRIZZARY-ORTIZ M., LYONS D. et READON A. (2003) - Evapotranspiration estimation for South Florida. *Actes du colloque "World water and environmental resources"* (Philadelphie, USA), P. BIZIER et P.A. DEBARRY édit., 9 p.
- ADEBOYE O.B., OSUNBITAN J.A., ADEKALU K.O. et OKUNADE D.A. (2009) - Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and temperature based models in estimating reference evapotranspiration. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, manuscrit n° 1291, vol. XI, 25 p.
- AHOOGHALANDARI M., KHIADANI M. et JAHROMI W.E. (2016) - Calibration of Valiantzas' reference evapotranspiration equations for the Pilbara region, western Australia. *Theoretical and Applied Climatology*, 12 p.
- ALBRECHT F (1950) - Die methoden zur bestimmung verdunstung der natürlichen erdoberfläche. *Archiv für Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie*, série B, vol. 2, p. 1-38.

- ALEXANDRIS S., STRICEVIC R. et PATKOVIC S. (2008) - Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, vol. 21, n°22, p. 17-28.
- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D. et SMITH M. (1998) - *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop requirements*. FAO irrigation and drainage paper, vol. 56, Rome, 15 p.
- BAKHTIARI B., GHLIRMAN N., LIAGHAT A.M. et HOOGENBOOM G. (2011) - Evaluation of reference evapotranspiration models for a semi-arid environment using lysimeter measurements. *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 13, n° 2, p. 223-237.
- BODIAN A., NDIAYE O. et DACOSTA H. (2016) - Évolution des caractéristiques des pluies journalières dans le bassin versant du fleuve Sénégal : avant et après rupture. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 61, n° 5, p. 905-913.
- BOUKHLASSA S. et PARÉ S. (2006) - Évapotranspiration de référence dans la région de Tafilalet au sud-est du Maroc. *AJEAM-RAGÉE*, vol. 11, p. 1-16.
- CHATZITHOMAS C.D. et ALEXANDRIS S.G. (2015) - Solar radiation and relative humidity based, empirical method, to estimate hourly reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, vol. 152, p. 188-197.
- COSANDEY C. et ROBINSON M. (2000) - *Hydrologie continentale*. Édit. Armand Colin, Paris, 353 p.
- DALTON J. (1802) - Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam of vapour from waters and other liquids in different temperatures, both in a torricellian vacuum and in air on evaporation and on the expansion of gases by heat. *Memoirs of the Manchester Literary and Philosophical Society*, vol. 5, partie 2, p. 535-602.
- DEMBELE Y. (2010) - *Cartographie des zones socio-rurales du Burkina Faso. Un outil d'aide à la planification pour la gestion de l'eau en agriculture*. Édit. FAO, Rome (Italie), 68 p.
- DIOP L., BODIAN A. et DIALLO D. (2015) - Use of atmometers to estimate reference evapotranspiration in Arkansas. *African Journal of Agricultural Research*, vol. 10, n° 48, p. 4376-4683.
- DIOUF O.C., WEIHERMÜLLER L., BA K., FAYE S.C., FAYE S. et VEREECKEN H. (2016) - Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith Formula in Senegal. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, vol. 110, n°1, p. 117-137.
- DJAMAN K., BALDE A.B., SOW A., MULLER B., IRMAK S., NDIAYE M.K., MANNEH B., MOUKOUMBI Y.D., FATAKUCHI K. et SAITO K. (2015) - Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 3, p. 139-159.
- DJAMAN K., IRMAK S., ASCE M., KABENGA I. et FUTAKUCHI K. (2016-a) - Evaluation of FAO56 Penman-Monteith model with limited data and the Valiantzas models for estimating cross reference evapotranspiration in sahelian conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 142, n° 11, p. 1-14.
- DJAMAN K., TABARI H., BALDE A.B., DIOP L., FUTAKUCHI K. et IRMAK S. (2016-b) - Analyses, calibration and validation of evapotranspiration models to predict grass-reference evapotranspiration in the Senegal river delta. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 8, p. 82-94.

- DJIKOU S. (2006) - *Calcul de l'ETP Penman-Monteith à différents pas de temps sur quatre sites du haut bassin de l'Ouémé*. Mémoire de stage, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Montpellier, 35 p.
- FISHER D.K. et PRINGLE III H.C. (2013) - Evaluation of alternative methods for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural Sciences*, vol. 4, n° 8A, p. 51-60.
- HEYDARI M.M., AGHAMAJIDI R., BEYGIPOOR G.H. et HEYDARI M. (2014) - Comparison and evaluation of 38 equations for estimating reference evapotranspiration in an arid region. *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 23, n° 8, p. 1985-1996.
- HARGREAVES G.H. (1975) - Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, vol. 18, n° 5, p. 980-984.
- IBTISSEM L. (2007) - *Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée "choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle ETP dans les régions de Tébessa et Annaba"*. Mémoire de Magistère, Université Hadj Lakhdar (Batna, Algérie), 175 p.
- IRMAK S., ALLEN R.G. et WHITTY E.B. (2003-a) - Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 129, n° 5, p. 360-370.
- IRMAK S., IRMAK A., JONES J.W., HOWELL T.A., JACOBS J.M., ALLEN R.G. et HOOGENBOOM G. (2003-b) - Predicting daily net radiation using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 129, n° 4, p. 256-269.
- IRMAK S., IRMAK A. et JONES J.W. (2003-c) - Solar and net radiation based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 129, n° 5, p. 336-347.
- JENSEN M.E. et HAISE H.R. (1963) - Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, vol. 89, p. 15-41.
- JIA X., SCHERER TH., LIN D., ZHANG X. et REFAL I. (2013) - Comparison of reference evapotranspiration calculations for southeastern north Dakota. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, vol. 2, n° 3, p. 1-9.
- MAHRINGER W. (1970) - Verdunstungsstudien am Neusiedler See. *Archiv für Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie*, série B, n° 18, p. 1-20.
- MAKHLOUFI A. (2010) - *Calibrage spatial et temporel de quelques relations d'usage courant pour l'estimation de l'évapotranspiration de l'Algérie du Nord*. Mémoire de Magistère, Université Hadj Lakhdar (Batna, Algérie), 117 p.
- MAKKINK G.F. (1957) - Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineering*, vol. 11, n° 3, p. 277-288.
- MARTI P., ZARGO M., VANDERLINDEN K. et GIRONA J. (2015) - Parametric expressions for the adjusted Hargreaves coefficient in Eastern Spain. *Journal of Hydrology*, vol. 529, n° 3, p. 1713-1724.
- MUSY A. et HIGY C. (2004) - *Hydrologie. Une science de la nature*. Édit. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (Suisse), 314 p.
- NAOREM N. et DEVI T.K (2014) - Estimation of potential evapotranspiration using empirical models for Imphal. *International Journal of Innovative and Exploring Engineering*, vol. 4, n° 7, p. 119-123.

- OMM (1994) - *Guides des pratiques hydrologiques : acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications*. Édit. Organisation Météorologique Mondiale, Genève (Suisse), vol.°168, 5^{ème} édition, 793 p.
- OUDIN L. (2005) - *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. Thèse de Doctorat de l'École Nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), 496 p.
- OUEDRAGO M. (2012) - Impact des changements climatiques sur les revenus agricoles au Burkina Faso. *Journal of Agriculture and Environment*, vol. 106, n° 1, p. 3-21.
- PENMAN H.L. (1963) - *Vegetation and hydrology*. Édit. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden (Angleterre), communication technique n° 53, 124 p.
- PRIESTLEY C.H.B. et TAYLOR R.J. (1972) - On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, vol. 100, n° 2, p. 81-92.
- RAVAZZANI G., CORBARI C., MORELLA S., GIANOLI P. et MANCINI M. (2012) - Modified Hargreaves-Samani equation for the assessment of reference evapotranspiration in Alpine river basins. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 138, n° 7, p. 592-599.
- RIOU C. (1975) - *La détermination pratique de l'évaporation ; application à l'Afrique Centrale*. Édit. ORSTOM, Paris, 234 p.
- ROCHE M. (1963) - *Hydrologie de surface*. Édit. Gauthier-Villars / ORSTOM, Paris, 431 p.
- SHAHIDIAN S., SENALHEIRO R., SERRANO J., TEIXEIRA J., HAIE H. et SANTOS F. (2012) - Hargreaves and other reduced-set methods for calculating evapotranspiration. In : *Evapotranspiration. Remote Sensing and Modeling*, chapitre 4, Édit. Intech, en ligne, p. 59-80.
- TABARI H. (2010) - Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*, vol. 24, n° 10, p. 2311-2337.
- TABARI H. et TALAEE P.H. (2011) - Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for Estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 16, n° 10, p.837-845.
- TRAORE F. (2007) - *Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso*. Mémoire DEA, Université de Liège (Belgique), 133 p.
- TRABERT W (1896) - Neue beobachtungen über verdampfungsgeschwindigkeiten. *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 13, p. 261-263.
- TRAJKOVIC S (2007) - Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 133, n° 1, p. 38-42.
- TURC L. (1961) - Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour. *Annales Agronomiques*, vol. 12, p. 13-49.
- VALIANTZAS J.D. (2012-a) - Simple ET forms of Penman's equation without wind and/or humidity data. I: Theoretical development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 139, n° 1, p. 1-8.
- VALIANTZAS JD (2012-b) - Simple ET forms of Penman's equation without wind and/or humidity data. II: comparisons with reduced set-FAO and other methodologies. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 139, n° 1, p. 9-19.
- VALIANTZAS J.D. (2012-c) - Simplified reference evapotranspiration formula using an

-
- empirical impact factor for Penman's aerodynamic term. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 18, p. 108-114.
- VALIPOUR M. (2015) - Calibration of mass transfer-based methods to predict reference crop evapotranspiration. *Applied Water Science*, vol. 1, n° 1, p. 1-11.
- WMO (1966) - *Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration*. Édit. World Meteorological Organization, note technique n° 83, Genève (Suisse), 121 p.
- XU C.Y. et SINGH V.P. (1998) - Dependence of evaporation on meteorological variables at different time scales and intercomparison of estimation methods. *Hydrological Processes*, vol. 12, n° 3, p. 429-442.
- XU C.Y. et SINGH V.P. (2000) - Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, vol. 14, n° 2, p. 339-349.
- XU C.Y. et SINGH V.P. (2001) - Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, vol. 15, n° 2, p. 305-319.

Article reçu le 6 janvier 2017.

Accepté après révision le 27 mai 2017.

Mis en ligne le 16 juin 2017.