



**Evaluation du bilan hydrique dans les milieux anthropisés de la forêt claire
(région de Lubumbashi, Province du Haut-Katanga, R.D. Congo).
Méthodologie adoptée pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle**

**Water balance assessment in woodland anthropogenic environments
(Lubumbashi Region, Upper Katanga Province, D.R. Congo).
Methodology for the estimation of potential evapotranspiration**

Gabriel TETEKI MUTONDO⁽¹⁾, Donatien KALOMBO KAMUTANDA⁽¹⁾
& Albert MBUYU NUMBI⁽¹⁾

Abstract: The current global context of climate change requires us to know the extreme probable limits of certain components of the water balance, in particular evapotranspiration, the agricultural deficit, the surplus water in the soil, ... in woodland anthropogenic environments like Lubumbashi Region (28°29' E, 11°35' S, 1298 m of altitude). In the Lubumbashi region, a recent study (Kalombo, 2015) indicates that the rainy season is marked by an increasingly noticeable late start, early endings and increasingly long dry periods. At present, directly measuring the quantities of water that participate in the different biological functions in a ecosystem is much more difficult in regions such as Lubumbashi ⁽²⁾, and the difficulties increase when the study environment includes a forest with multiple vegetation strata and that the interval of time must be small enough to account for the succession of phenomena during the year ; this is why we used the method of Thornthwaite and Mather (1955) for the water balance. These authors have, by mutual agreement, developed a method for simulating the elements of the water balance; the latter has the advantage of being simple and therefore largely affordable in our regions when modern measurements techniques are difficult to access.

Key words: Precipitation, potential evapotranspiration, water balance, Lubumbashi.

Résumé : Le contexte global actuel marqué par le changement climatique nous impose la nécessité de connaître les limites probables extrêmes dans lesquelles se manifestent certaines composantes du bilan hydrique notamment l'évapotranspiration, le déficit agricole, le surplus d'eau dans le sol, ... dans les milieux anthropisés de la forêt claire, comme la région de Lubumbashi (28°29' E, 11°35' S, 1298 m d'altitude). Dans la région de Lubumbashi, la saison de pluie est marquée, d'après une étude récente (Kalombo, 2015), par un démarrage tardif de plus en plus perceptible, par des fins précoces et par des épisodes secs de plus en plus longs. Actuellement, mesurer directement les quantités d'eau qui participent aux différentes fonctions biologiques dans un écosystème est très difficile et davantage dans des régions comme celle de Lubumbashi ⁽²⁾, et ces difficultés augmentent lorsque le milieu étudié comporte une forêt avec de multiples strates de végétation et que l'intervalle de temps doit être suffisamment petit pour rendre compte de la succession des phénomènes au cours de l'année ; c'est la raison pour laquelle pour l'établissement du bilan hydrique, nous avons recouru à la méthode de Thornthwaite et Mather (1955). Ces auteurs ont, d'un commun accord, mis au point une méthode de simulation des éléments du bilan hydrique ; cette dernière présente l'avantage d'être simple et, par conséquent, largement abordable dans nos régions où les techniques modernes de mesure sont difficilement accessibles.

Mots clés : Précipitations, évapotranspiration potentielle, bilan hydrique, Lubumbashi.

⁽¹⁾ Université de Lubumbashi (R.D. Congo), Faculté des Sciences, Département de Géographie

gabrielteteka@yahoo.fr

kamutanda50@yahoo.fr

almbuyunumbi@gmail.com

⁽²⁾ Cette étude fait partie d'un ensemble de recherches relatives à l'écosystème miombo, dont l'initiative revient au Professeur François MALAISSE

INTRODUCTION

Le travail sur l'analyse du bilan hydrique dans les milieux anthropisés de la forêt claire, notamment dans la région de Lubumbashi, se fixe comme principal objectif, l'estimation de l'évolution mensuelle des composantes du bilan hydrique telles que l'évapotranspiration réelle, le déficit agricole, le surplus d'eau dans le sol et autres.

Dans le contexte global actuel marqué par le changement climatique, d'après une étude récente concernant le déroulement des saisons pluvieuses dans la région de Lubumbashi (KALOMBO, 2015), les saisons de pluie sont marquées par un démarrage tardif de plus en plus perceptible, par des fins précoces ainsi que par des épisodes secs de plus en plus longs par rapport à ce qui avait été observé de 1916 à 1978 (MALAISSE et al., 1978 ; HARJOABA & MALAISSE, 1978). Nous parlerons de « saison des pluies », d'un point de vue climatique et non des trois saisons des pluies distinguées au cours d'une même année, par les études écologiques (MALAISSE, 1974). Dès lors, nous sommes amenés à nous interroger comment les événements climatiques influent sur l'évolution des composantes du bilan hydrique dans la région de Lubumbashi. Enfin nous ne prendrons pas en considération les différences observées en fonction du couvert végétal (forêt dense sèche, forêt claire ou savane), ni les variations en fonction de la profondeur du sol et par le fait certains aspects des changements de la réserve du sol en eau, comme étudiées en détail par MALAISSE & KAPINGA (1987) pour la même région.

D'une part, l'obtention des données sur les éléments du climat, notamment les précipitations et les températures, a été aimablement facilitée par METTELSAT (Agence de Météorologie et Télédétection par Satellite) de l'aéroport de la Luano à Lubumbashi ; d'autre part, après une étude comparative de différentes formules utilisant certains indices et paramètres pour déterminer les pertes par évaporation comme celles de Turc, de Penman-Monteith et de Thornthwaite, seule la méthode fournie par Thornthwaite a été retenue dans le cadre de ce travail car utilisant des indices et paramètres généralement adaptés et acceptables pour les régions intertropicales.

Ce genre de recherche a été, jusqu'à présent, rare dans cette région ; une des plus connues et qui remonte aux années 70, est celle du professeur Jean ALEXANDRE (1977).

L'urgence de placer ce type d'étude dans la perspective du changement climatique en cours, nous a amené à apporter notre contribution pour enrichir ce thème comme souligné ci-dessus, afin de déceler quelques indices susceptibles de mettre en évidence l'impact du changement climatique sur les composantes du bilan hydrique.

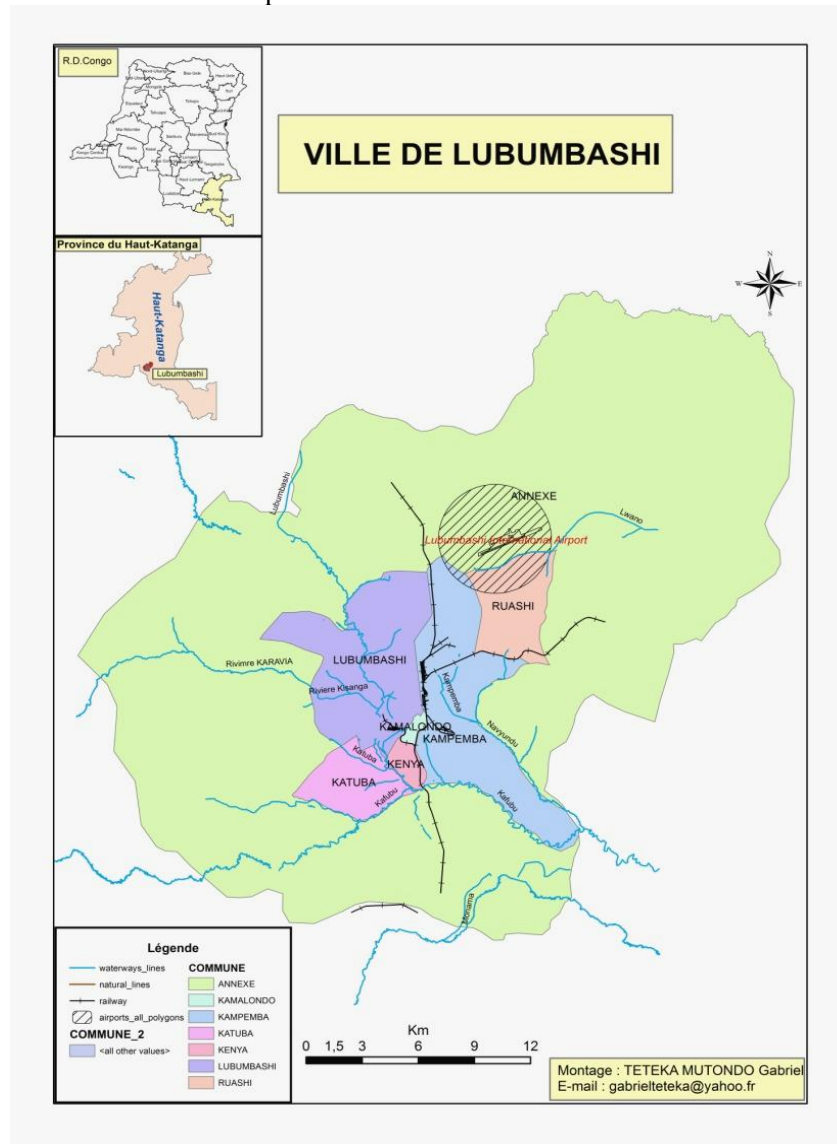
PRÉSENTATION DU SITE, DONNÉES, OUTILS ET MÉTHODES UTILISÉES

Cette étude a été réalisée à partir des données climatiques disponibles fournies par la station météorologique de METTELSAT de l'aéroport de la Luano (28°29' E, 11°35' S, 1298 m d'altitude) à Lubumbashi, province du Haut-Katanga, R.D. Congo (Carte 1).

L'étude critique des principales méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle notamment celles de Turc, de Penman-Monteith et de Thornthwaite nous a permis d'apprécier, en confrontant les résultats obtenus par leur application à cette station, les possibilités et les limites de leur emploi en hydro-climatologie d'une part, et résoudre des questions pratiques de différentes composantes du bilan hydrique telles que l'évapotranspiration réelle, l'eau disponible dans le sol pour les plantes, ... en adoptant la méthode de THORNTHWAITE & MATHER (1955) qui ont mis au point une méthode de simulation des éléments du bilan hydrique d'autre part.

Cette méthode est utilisée en agriculture ; elle donne également l'écoulement mensuel de l'eau dans les rivières. Ladite méthode est basée sur l'analyse mensuelle de diverses composantes du bilan hydrique : on calcule pour chaque mois la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration, compte tenu de l'humidité du sol ; les pluies s'infiltrent dans un sol sec et les plantes puisent de l'eau dans le sol en période de sécheresse. Dans les deux cas, l'effet des mois précédant celui de l'observation est prédominant. C'est un des apports originaux de cette méthode que de tenir compte des reports, d'un mois sur le suivant, de la variation des réserves de l'eau du sol et de la nappe souterraine.

Un schéma simple et généralisé par rapport aux différentes conditions pour différentes régions (chaudes ou froides) nous montre toutes les analyses nécessaires et l'interaction des éléments du bilan (HUFTY, 2001) (Figure 1). Envisageons en premier lieu le cycle annuel quand les précipitations dépassent l'évapotranspiration potentielle (point a). Le surplus d'eau qui tombe sert d'abord à reconstituer les réserves d'eau du sol (R). Quand le stock d'eau est reformé (b), le surplus d'eau s'écoule vers les nappes phréatiques et les rivières (S). Dans le cadre de notre étude, la composante (N) que nous trouvons entre les points c et d n'est pas à prendre en compte vu que la région de notre secteur d'étude est dans un climat tropical.



Carte 1.- Situation géographique de la région de Lubumbashi et du secteur de la Luano.

Quand les précipitations diminuent, l'évaporation se fait au détriment du stock (U). Remarquons que l'évaporation est inférieure à sa valeur potentielle et diminue à mesure que le sol s'assèche. Le déficit d'eau (M) indique ce qu'il faudrait ajouter par irrigation pour que les plantes et le sol aient de l'eau en suffisance.

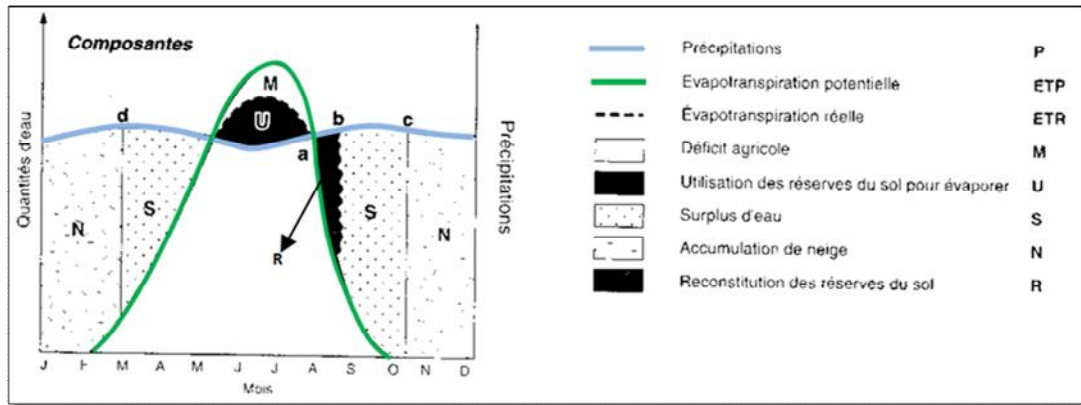


Figure 1 : Le bilan d'eau, synthétisé selon le schéma d'HUFTY (2001). On notera que la surface de U est égale à celle de R. Pour a, b, c et d : voir texte ci-avant.

1.- Calcul de l'E.T.P. par la méthode de Turc mensuelle

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle selon la méthode de Turc a été effectué pour cette station à partir des valeurs moyennes de la température pour la période 1970-2015 de METTELSAT et de la radiation globale mensuelle (FAO) pour la même station.

La formule de Turc, qui dérive de la simplification de la formule de Penman, ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou de la durée d'insolation. Cette formule est la suivante :

$$ETP = 0,4 \cdot \frac{t}{t + 15} \cdot (I_g + 50) \cdot K$$

ETP, évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau) ;

t, température moyenne mensuelle de l'air (en °C) ;

I_g, radiation globale mensuelle reçue au sol (en calorie/cm²/jour) ;

K, un coefficient égal à 1 si l'humidité relative *H_r* est supérieure à 50% (comme pour le climat considéré dans le présent travail, toutes les valeurs mensuelles de *H_r* sont supérieures à 50% sauf celle du mois de septembre, voir tableau 3) ;

$$\text{si non } K = 1 + \frac{50 - H_r}{70}$$

Si la radiation globale *I_g* n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation *h* par la formule : $I_g = I_gA [0,18 + 0,62 \frac{h}{H}]$ où *I_gA* : radiation globale théorique (en cal/cm /jour).

2.- Calcul de l'E.T.P. par l'équation FAO 56 de Penman-Monteith

ALLEN et al. (1988) ont apporté une simplification à l'équation de Penman-Monteith en faisant un certain nombre de suppositions sur des paramètres qu'ils ont considérés comme constants. Ainsi, ils ont supposés constant λ , le flux de chaleur latente de vaporisation. Ils ont fixé la résistance du couvert végétal *r_c* à une valeur de 70 s/m et simplifié l'expression de la résistance aérodynamique en l'approximant par une fonction inverse de la vitesse du vent ($r_a = 208/u$) (HOWELL & EVETT, 2004).

La formule développée prend la forme suivante :

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e^0 - e)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)}$$

Avec : ET_0 , évapotranspiration de référence (mm/j)
 T , température de l'air (°C)
 u_2 , vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol (m/s)
 Δ , rapport entre la différence de pression de vapeur et la différence de température correspondant (kPa/°C)
 γ , constante psychrométrique ($\gamma \sim 66 \text{ Pa/}^\circ\text{K}$)
 Rn , le rayonnement net à la surface du sol (MJ/m²/j)
 G , le flux de chaleur du sol (MJ/m²/j)
 e , pression de vapeur (kPa)
 e^0 , pression de vapeur saturante à la température T_0 de référence (kPa)

La formule de Penman-Monteith donne l'évapotranspiration d'une surface herbeuse, bien alimentée en eau, d'une hauteur de 0,12 m, d'une résistance de surface de 70 s/m et d'un albédo de 0,23 (ALLEN, 2000).

Pour ce faire, nous avons utilisé au départ les données climatiques pour la période 2000-2008 (l'humidité relative moyenne mensuelle en %, la vitesse moyenne mensuelle du vent en m/s, la durée moyenne mensuelle d'ensoleillement en heure/jour et la température moyenne mensuelle en °C) qui nous ont permis, à l'aide de l'outil Instat+, de générer les valeurs moyennes mensuelles d'ETP *sensu* Penman-Monteith.

3.- Calcul de l'E.T.P. par la méthode de Thornthwaite

L'évapotranspiration potentielle est celle qui correspond à un sol humide et à des plantes qui ont assez d'eau à leur disposition. En pratique, on utilise une ETP climatique, qui correspond à celle d'un gazon humide. Cependant l'évaporation potentielle qui est introduite dans le bilan dépend du but poursuivi. Ainsi, en ce qui nous concerne, nous avons recouru à la méthode de THORNTWHAITE (1948) qui a proposé une formule basée essentiellement sur les températures de l'air.

Ainsi,
$$ETP = 16 \cdot \left(10^{\frac{t}{I}}\right)^a \cdot K \quad i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,5} \text{ et } I = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$a = \frac{1,6}{100} \cdot I + 0,5 \quad c = \left(10^{\frac{t}{I}}\right)^a$$

ETP est l'évapotranspiration potentielle du mois considéré ;

t est la température mensuelle moyenne du mois considéré ;

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$$

K est un coefficient d'ajustement mensuel ;

i est l'indice thermique mensuel calculé à partir des températures moyennes mensuelles

I est l'indice thermique annuel, il est la somme des indices thermiques mensuels ;

c est la valeur à multiplier par 16 pour trouver l'évaporation mensuelle non corrigée en mm (voir la formule de l'ETP ci-dessus).

Tableau 1 : Valeurs mensuelles du coefficient K (voir table pour 10° de Latitude Sud)

Mois	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
K	1	1,01	1	1,06	1,05	1,1	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96

4.- Estimation des composantes du bilan hydrique

Le tableau repris ci-dessous précise les méthodes d'estimation ou de calcul pour les diverses composantes du bilan.

Tableau 2 : Méthodes d'estimation ou de calcul des diverses composantes du bilan hydrique

Composante du bilan	Méthode d'estimation ou de calcul
1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	Voir (Estimation de l'E.T.P. par la méthode de Thornthwaite)
2. Calcul de la différence entre l'ETP et les précipitations mensuelles P	Faire simplement pour chaque mois P-ETP
3. Evaluation de la réserve d'eau disponible dans le sol	Après de nombreuses observations, Thornthwaite est arrivé aux conclusions suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ✓ La réserve utile dépend de la nature du sol et varie entre 100 mm d'eau par mètre de profondeur pour les sables, à 300 mm pour les argiles. ✓ Suivant la profondeur des racines, donc le type de végétation, il fait intervenir une tranche plus ou moins épaisse de sol : pour les plantes cultivées, elle est de 50 cm à 1 m et de 2 m ou plus pour une forêt. <p>Pour évaluer cette dernière, il suffit de cumuler de mois en mois les différences P-ETP, à partir du premier mois où les précipitations sont inférieures à l'évaporation potentielle. Thornthwaite a présenté ses observations sous forme d'un tableau à double entrée, qui permet de lire la réserve qui reste disponible dans le sol, compte tenu de la capacité du sol et du cumul des déficiences mensuelles d'eau.</p> $R_i = RU e^{-\text{cumul des ETP-P/RU}}$ <p>où R_i est la réserve d'eau dans le sol au temps i et RU la réserve utile (voir tableau 1). On peut aussi écrire pour un calcul itératif mois après mois :</p> $R_i = R_{i-1} e^{-D/RU}$ <p>où : D est la différence entre ETP et P pour le mois ; i et R_{i-1} la réserve du mois précédent. NB. Le sol du site d'étude étant argilo-sablonneux, la réserve maximale utile est estimée à 200 mm dans le cadre de cette étude.</p>
4. Calcul de l'évaporation réelle (ETR) et du déficit agricole	Si, pour un mois, les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle, ETR équivaut à ETP. Dans l'autre cas l'ETR est inférieure à la valeur potentielle. Le changement de réserve entre deux mois indique donc l'eau du sol perdue par évaporation d'un mois à l'autre. En résumé, l'ETR est donc égale à la somme des précipitations et du changement de la réserve. <p>Le déficit agricole est la différence entre ETP et ETR. C'est un résultat important du bilan puisqu'il indique la quantité d'eau</p>

	qu'il faudrait apporter par irrigation à des cultures
5. Calcul du surplus d'eau	Comme la température est supérieure au point de gel (en pratique, si $t_{\text{moy}} > -1^{\circ}\text{C}$), le surplus d'eau est la quantité disponible pour l'écoulement vers la nappe aquifère et les rivières ; si le sol est gorgé d'eau, le surplus est la différence entre les précipitations et l'évaporation ; si le sol n'est pas gorgé d'eau, cas le plus fréquent à la fin d'une période sèche, l'excédent des précipitations sur l'évaporation sert d'abord à reconstituer la réserve d'eau du sol jusqu'à remplissage ; ensuite, ce qui reste éventuellement forme le surplus, qui est destiné à l'écoulement.
6. Calcul de l'écoulement vers les rivières	Thornthwaite propose la règle empirique suivante, après avoir étudié de nombreux cours d'eau : 50% du surplus d'eau d'un mois s'écoulent vers les rivières pendant ce mois et le reste va rejoindre les nappes aquifères. Ce reste va alors s'écouler par l'intermédiaire des sources, en diminuant progressivement son influence. La règle adoptée est simple : $\frac{1}{4}$ du surplus d'un mois s'écoule pendant le mois suivant (ce qui équivaut à 50% du reste), $\frac{1}{8}$ pendant le 3 ^e mois, $\frac{1}{16}$ le 4 ^e mois, etc.

RESULTATS ET DISCUSSION

En plus de l'évapotranspiration Penman-Monteith calculée avec l'outil Instat+, d'autres paramètres accompagnant le calcul de l'ETP Penman-Monteith sont générés à l'aide du même outil Instat+. (Tableau 3).

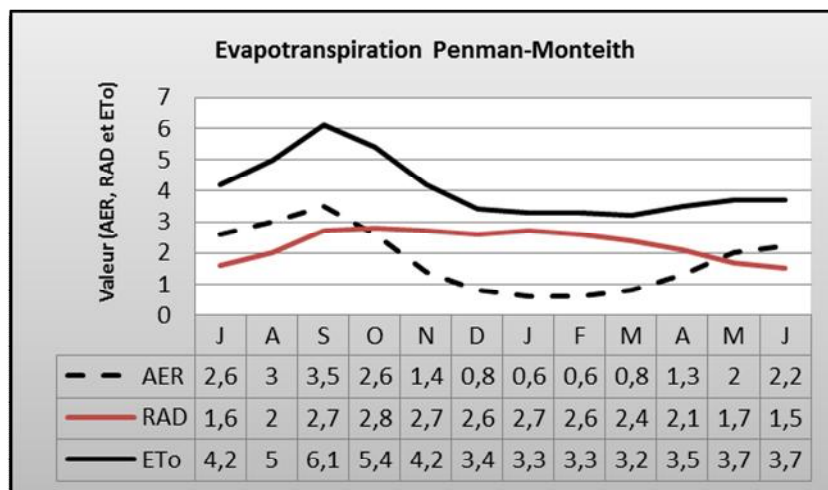


Figure 2 : Evapotranspiration Penman-Monteith (ETo) – Radiation (RAD) – limite aérodynamique (AER).

Tableau 3 : Différents éléments pour le calcul de l'ETP Penman-Monteith

Avec : T_{mean} : température moyenne mensuelle ($^{\circ}\text{C}$), RH_{mean} : humidité relative moyenne mensuelle (%), S_{uh} : ensoleillement moyen journalier pour chaque mois (heure /jour), M_{sc} : vitesse du vent (m/s), VPD : déficit de la pression de vapeur, AER : limite aérodynamique, R_s : radiation solaire, R_{ns} : radiation nette des ondes courtes, R_{nl} : perte nette des ondes longues, R_n : radiation nette, RAD : radiation, ET_o , évapotranspiration (mm).

	Tmean (°C)	RHmean (%)	Suh (heure/j)	Msc (m/s)	VPD	AER	Rs	Rns	Rnl	Rn	RAD	ETo	ETP Men- suelle (mm)
Juillet	18,1	59,1	7,4	4,9	0,8	2,6	16,8	12,9	4,5	8,5	1,6	4,2	130,2
Août	20,1	53,9	7,4	4,5	1,1	3,0	18,4	14,2	4,4	9,8	2,0	5,0	153,7
Septem- bre	23,4	47,8	8,2	4,1	1,5	3,5	21,5	16,5	4,8	11,8	2,7	6,1	184,1
Octobre	24,6	51,3	5,6	3	1,5	2,6	18,5	14,3	3,2	11,0	2,8	5,4	166,9
Novem- bre	22,8	72,5	5,1	3	0,8	1,4	18,0	13,8	2,5	11,4	2,7	4,2	124,7
Décem- bre	21,3	83,8	4,5	2,8	0,4	0,8	17,0	13,1	2,1	11,0	2,6	3,4	104,3
Janvier	21,1	85,5	4,5	2,4	0,4	0,6	17,1	13,2	2,1	11,1	2,7	3,3	101,9
Février	21,1	84,8	4,4	2,5	0,4	0,6	16,9	13,0	2,1	10,9	2,6	3,3	94,9
Mars	21,1	84,1	4,5	3,3	0,4	0,8	16,4	12,6	2,2	10,4	2,4	3,2	99,5
Avril	21,2	77,3	5,2	3,8	0,6	1,3	16,0	12,3	2,7	9,7	2,1	3,5	104,0
Mai	19,9	66,5	5,2	4	0,8	2,0	14,4	11,1	3,0	8,1	1,7	3,7	113,5
Juin	17,9	63,5	6,6	4,4	0,7	2,2	15,3	11,8	3,9	7,9	1,5	3,7	110,1

Tableau 4 : ETP Penman-Monteith - ETP Turc mensuelle – ETP Thornthwaite

ETP (mm)	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
ETP Penman-Monteith (FAO 1992)	121	146	168	180	138	115	112	98	118	120	121	111
ETP Penman-Monteith	130	154	184	167	125	104	102	95	100	104	114	110
ETP Turc mensuelle	112	128	149	148	126	109	107	107	114	122	116	108
ETP Thornthwaite	55	70	99	117	98	87	84	75	82	78	69	51

N.B : Pour le calcul de l'ETP Turc mensuelle, nous avons utilisé les valeurs de la radiation globale moyenne mensuelle (I_g) fournies par la FAO pour la même station.

Tableau 5 : Température et radiation globale (FAO).

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
T (°C)	18,1	20,1	23,4	24,6	22,8	21,3	21,1	21,1	21,1	21,2	19,9	17,9
I _g (en calorie/cm ² /jour)	462	507	543	545	474	412	410	409	439	469	459	446

Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes

L'examen de différents graphiques de tendance des valeurs de l'évapotranspiration potentielle moyenne calculées par les différentes méthodes montre une grande ressemblance entre les résultats des méthodes de Turc mensuelle et de Penman-Monteith, pour cette station. La méthode de Thornthwaite sur l'ensemble des données fournit des valeurs d'évapotranspiration potentielle nettement inférieures. Ce fait est illustré par le graphique de la figure 3 sur lequel ont été portées les différentes valeurs d'évapotranspiration pour différentes méthodes. On observe des écarts aussi importants suite aux

limites des latitudes de notre champ d'investigation. Ainsi, pour des latitudes comme les notre, l'utilisation de l'une ou de l'autre méthode devra être discutée (¹).

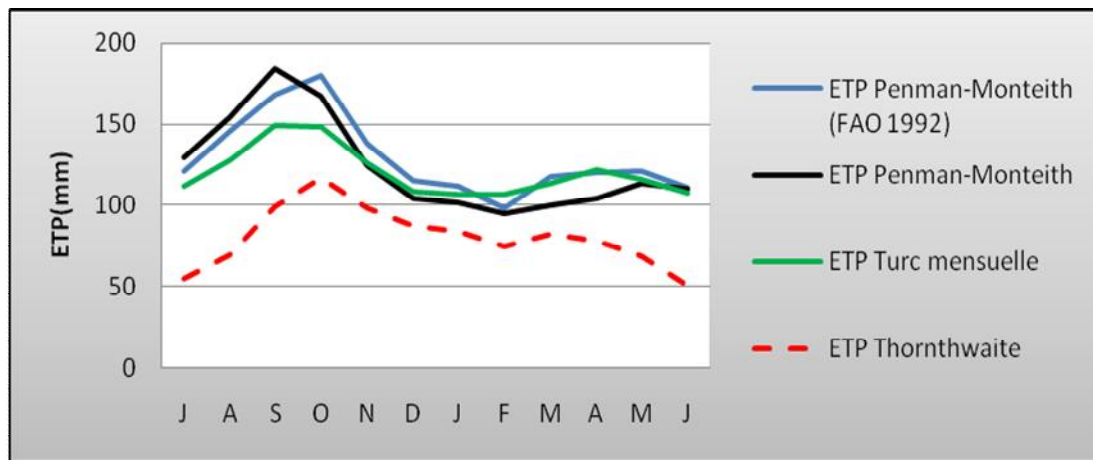


Figure 3 : ETP mensuelle pour la station de la Luano/Lubumbashi

Bilan Hydrique

Pour essayer de préciser les limites dans lesquelles les différentes composantes du bilan d'eau peuvent se manifester, nous nous sommes intéressé, en plus de l'année moyenne (1970-2015), aux deux années extrêmes détectées pendant cette période c'est-à-dire années à forte et celle à faible pluviométrie annuelle enregistrées pendant les 45 années d'observation.

A l'issue de cette étude « préliminaire », nous avons tenté un appât du bilan hydrologique mensuel du secteur de la Luano dont les résultats ne pourront donner que les indications de tendance.

Ainsi, la préférence était d'appliquer à ce titre la méthode de Thornthwaite pour l'année hydrologique moyenne (1970-2015) et pour les deux années extrêmes c'est-à-dire année à forte pluviométrie et celle à faible pluviométrie afin de préciser les intervalles ou les limites probables puisque nous disposons de vraies moyennes pour toutes les données initiales nécessaires pour son application.

Calcul du bilan hydrique

Le calcul et les résultats des bilans hydriques sont rassemblés dans les tableaux 9, 10 et 11.

1). Verticalement : Les éléments du bilan pour chaque mois de l'année et ce, à partir du mois de juillet considéré comme premier mois virtuel de fin de la saison sèche à Luano, et comme mois marquant le début de l'année hydrologique. En dernière colonne, ce sont les valeurs annuelles qui y sont marquées.

2). Horizontalement : chaque élément du bilan, avec de haut en bas :

- Les précipitations (P);
- L'évapotranspiration potentielle (ETP);
- La différence entre précipitations et évapotranspiration potentielle (P-ETP) ;
- La réserve d'eau utile ou la rétention du sol (Estimée à 200 mm dans le cadre de ce travail);

¹ Cf. –rapport 71 –SGN-173-HYD : Utilisation comparée des formules de Thornthwaite, Turc mensuel, Turc annuel et Penman, pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle et de l'évapotranspiration réelle moyenne (DELAROZIERE-BOUILLIN, 1971).

- La variation (changement) de la réserve du sol (superficielle) ;
- L'évapotranspiration réelle ou effective (ETR) ;
- Le déficit agricole ;
- Le surplus d'eau ;
- L'écoulement théorique ;

Tous ces éléments sont exprimés en millimètres de hauteur d'eau.

Tableau 6 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'année moyenne (1970-2015)

Mois	t	i	c	K	ETP (mm)
Juillet	18,1	7,013	3,417	1	55
Août	20,1	8,219	4,348	1,01	70
Septembre	23,4	10,346	6,168	1	99
Octobre	24,6	11,159	6,920	1,06	117
Novembre	22,8	9,947	5,810	1,05	98
Décembre	21,3	8,973	4,968	1,1	87
Janvier	21,1	8,846	4,862	1,08	84
Février	21,1	8,846	4,862	0,97	76
Mars	21,1	8,846	4,862	1,05	82
Avril	21,2	8,909	4,915	0,99	78
Mai	19,9	8,095	4,249	1,01	69
Juin	17,9	6,896	3,331	0,96	51

Tableau 7 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'année à forte pluviométrie (1977-1978)

Mois	t	i	c	K	ETP (mm)
Juillet	16,4	6,040	2,728	1	44
Août	19,7	7,972	4,159	1,01	67
Septembre	23,3	10,279	6,118	1	98
Octobre	24,8	11,297	7,062	1,06	120
Novembre	22,9	10,013	5,879	1,05	99
Décembre	21,9	9,358	5,306	1,1	93
Janvier	22	9,423	5,361	1,08	93
Février	22,3	9,618	5,531	0,97	86
Mars	21,6	9,165	5,140	1,05	86
Avril	21,3	8,973	4,977	0,99	79
Mai	19,1	7,608	3,873	1,01	63
Juin	16,8	6,264	2,884	0,96	44

Tableau 8 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'année à faible pluviométrie (2000-2001)

Mois	t	i	c	K	ETP (mm)
Juillet	17,5	6,664	3,334	1	53
Août	21,1	8,846	5,127	1,01	83
Septembre	23,4	10,346	6,504	1	104
Octobre	24,4	11,022	7,161	1,06	122
Novembre	21,8	9,294	5,526	1,05	93
Décembre	21	8,782	5,071	1,1	89
Janvier	20,2	8,281	4,638	1,08	80

Février	20,7	8,593	4,906	0,97	76
Mars	21	8,782	5,071	1,05	85
Avril	21,1	8,846	5,127	0,99	81
Mai	19,1	7,608	4,077	1,01	66
Juin	17,4	6,606	3,290	0,96	51

Tableau 9 : Bilan hydrique de l'année à forte pluviométrie (1977-1978)

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Année
T	16,4	19,7	23,3	24,8	22,9	21,9	22	22,3	21,6	21,3	19,1	16,8	21,0
P	0	3	6	51	188	422	376	254	215	131	0	0	1646
ETP	44	67	98	120	99	93	93	86	86	79	63	44	972
P-ETP	-44	-64	-92	-70	89	329	283	168	129	52	-63	-44	674
Réserve	49	0	0	0	89	200	200	200	200	200	137	93	
Chang. de rés.	-44	-49	-92	-70	89	111	0	0	0	0	-63	-44	
ETR	44	52	6	51	99	93	93	86	86	79	63	44	796
Déf. agr.	0	15	92	69	0	0	0	0	0	0	0	0	176
Surplus d'eau	0	0	0	0	0	218	283	168	129	52	0	0	851
Ecoulement	13	6	3	1	0	109	196	182	156	104	52	26	848

Tableau 10 : Bilan hydrique de l'année à faible pluviométrie (2000-2001)

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Année
T	17,5	21,1	23,4	24,4	21,8	21	20,2	20,7	21	21,1	19,1	17,4	20,7
P	0	0	0	21	111	129	202	124	112	15	0	4	718
ETP	53	83	104	121	93	89	80	76	85	81	66	51	982
P-ETP	-53	-83	-104	-100	18	40	122	48	27	-66	-66	-47	-264
Réserve	0	0	0	0	18	68	190	200	190	124	58	11	
Chang. de rés.	-11	-83	-104	-100	18	50	122	10	-10	-66	-66	-47	
ETR	11	0	0	21	93	89	80	76	85	81	66	51	653
Déf. agr.	42	83	104	100	0	0	0	0	0	0	0	0	329
Surplus d'eau	0	0	0	0	0	0	0	38	27	0	0	0	65
Ecoulement	1	0	0	0	0	0	0	19	23	12	6	3	64

Tableau 11 : Bilan hydrique de l'année moyenne (1970-2015)

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Année
T	18,1	20,1	23,4	24,6	22,8	21,3	21,1	21,1	21,1	21,2	19,9	17,9	21,0
P	0	0	5	38	141	246	261	222	186	46	5	0	1150
ETP	55	70	99	117	98	87	84	75	82	78	69	51	965
P-ETP	-55	-70	-94	-79	43	159	177	147	104	-32	-64	-51	185
Réserve	0	0	0	0	43	200	200	200	200	168	104	53	
Chang. de rés.	-53	-70	-94	-79	43	157	0	0	0	-32	-64	-51	
ETR	53	0	5	38	98	87	84	75	82	78	69	51	720
Déf. agr.	2	70	94	79	0	0	0	0	0	0	0	0	245
Surplus d'eau	0	0	0	0	0	2	177	147	104	0	0	0	430
Ecoulement	7	3	1	0	0	1	89	118	111	55	28	14	427

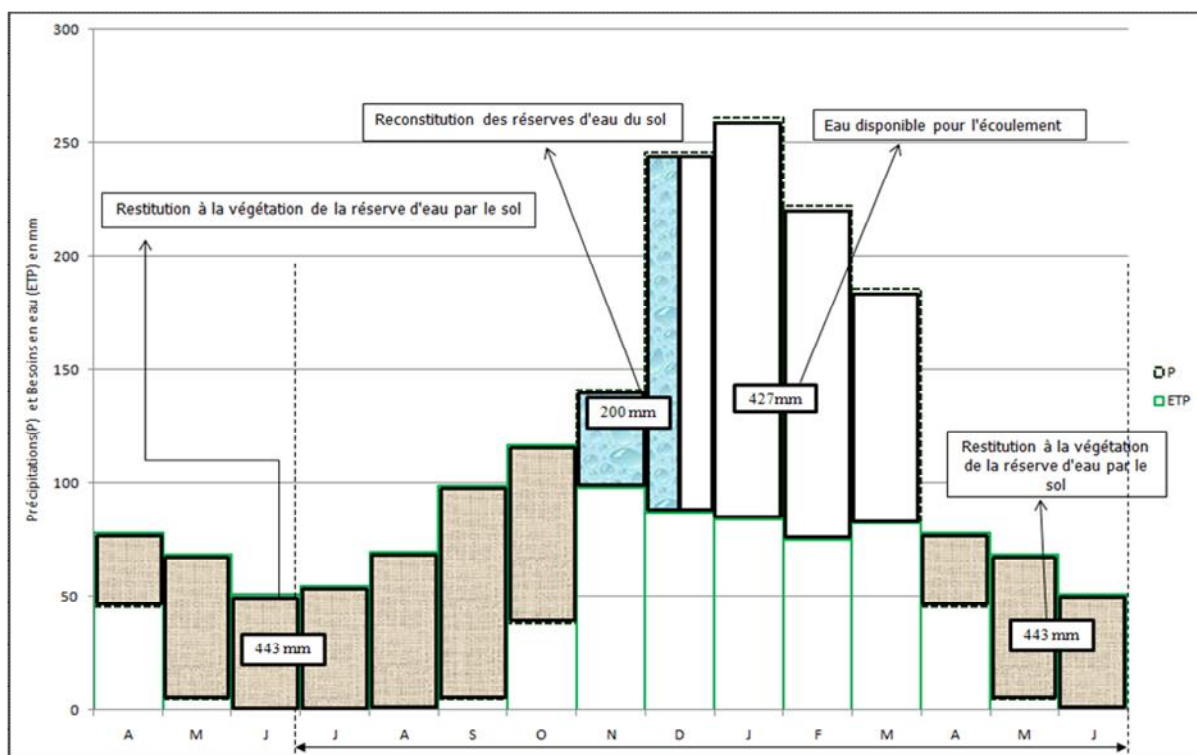


Figure 4 : Diagramme du bilan moyen annuel de l'eau

Tableau 12 : Exemple de variabilité du bilan d'eau pour les trois types de pluviométrie

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Année moyenne (1970-2015)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Année à faible pluviométrie (2000-2001)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Année à forte pluviométrie (1977-1978)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ETR = ETP	■											
ETR < 0,9ETP	■											
ETR < 0,5ETP	■											

De façon empirique, on a établi que les végétaux ont besoin d'humidité pour croître et que l'augmentation de la température favorise l'évaporation de cette humidité. Il faut donc dépasser la limite ' $P=2*T$ ' (P en mm) ou ' $P=T/5$ ' (P en cm) pour que les végétaux aient suffisamment d'eau pour pouvoir continuer leur croissance. En dessous de cette valeur, l'évapotranspiration réelle élimine une quantité trop élevée d'eau. Cette limite ne repose sur aucune théorie explicative mais bien sur l'expérience.

Ainsi, en se basant juste sur le bilan d'eau selon Thornthwaite et Mather pour l'année moyenne (1970-2015) dans le secteur de la Luano, nous sommes parvenus aux observations selon lesquelles :

- Après la saison sèche, la réserve d'eau commence à s'épuiser jusqu'à atteindre une valeur nulle en juillet, août, septembre et octobre. Comme par ailleurs, les précipitations sont tellement faibles voire nulles pour cette même période, l'évapotranspiration réelle semble prendre les valeurs dans les réserves du mois précédents pour atteindre sa valeur maximale.
- En septembre et octobre, les précipitations faibles sont dépensées intégralement en évapotranspiration réelle sans que celles-ci atteignent la valeur potentielle.
- En novembre, les précipitations sont suffisantes pour assurer l'intégralité de l'évapotranspiration réelle jusqu'à atteindre la valeur potentielle, et le surplus permet de reconstituer partiellement les réserves du sol.

- En décembre, les précipitations assurent l'intégralité de l'évapotranspiration potentielle, commencent à achever la reconstitution du stock d'humidité du sol et à alimenter le surplus d'eau.
- A partir de mi-décembre, janvier, février et mars, la réserve du sol ayant atteint le seuil de la capacité de rétention spécifique, tous les surplus des précipitations sur les valeurs de l'évapotranspiration potentielle sont partagés entre la reconstitution des réserves des nappes et l'écoulement.
- En avril, les précipitations ne sont plus suffisantes pour assurer l'intégralité de l'évapotranspiration potentielle ; le complément nécessaire est donc pris sur la réserve d'humidité du sol et par conséquent, l'écoulement commence à baisser.
- En mai, juin, juillet, août et septembre, toutes les précipitations étant presque nulles, l'évaporation est assurée à la valeur maximale pratiquement par les seules réserves du sol.
- En termes d'ETR et d'ETP, nous constatons que la variabilité du bilan hydrique concernant les trois types d'année est peu marquée.

CONCLUSION

L'analyse de différents graphiques et courbes de tendance des valeurs de l'évapotranspiration potentielle moyenne calculées avec différentes méthodes montre une grande ressemblance entre les résultats des méthodes de Turc et de Penman-Monteith, pour cette station. La méthode de Thornthwaite sur l'ensemble des données fournit des valeurs d'évapotranspiration potentielle nettement inférieures par rapport aux autres. Ce fait est illustré par le graphique de la figure 3 sur lequel ont été portées les différentes valeurs d'évapotranspiration pour différentes méthodes. On observe des écarts aussi importants entre ces valeurs suite aux limites des latitudes de notre champ d'investigation. Ainsi, pour des latitudes comme les nôtres, l'utilisation de l'une ou de l'autre méthode devra être discutée et même ajustée.

Les valeurs moyennes de précipitations et de températures durant les 45 ans d'observation nous ont permis de faire une ébauche des bilans hydriques mensuels par la méthode de Thornthwaite et Mather pour trois années hydrologiques suivantes :

- Année hydrologique moyenne : avec comme précipitations annuelles 1150 mm et comme température moyenne annuelle 21°C ;
- Année hydrologique à forte valeur des précipitations annuelles (1646 mm), et comme température moyenne annuelle 21°C ;
- Année hydrologique à faible valeur des précipitations annuelles (718 mm), et comme température moyenne annuelle 20,7°C ;

Pour l'année hydrologique moyenne, année qui donne des valeurs de tendance, le bilan annuel se résume théoriquement de la manière suivante : pour 1150 mm de précipitations annuelles et 965 mm d'évapotranspiration potentielle, nous avons trouvé une valeur de 720 mm pour l'évapotranspiration réelle (soit 62,6 % des précipitations) et une valeur de 427 mm pour l'écoulement (soit 37,1 % des précipitations).

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDRE J., 1977. Le bilan de l'eau dans le Miombo (forêt claire tropicale). *Bulletin de la Société géographique de Liège*, **13**: 107-126.
- ALLEN R.G., 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology* **229**: 27-41.
- ALLEN R. G., PEREIRA L.S., RAES D. & SMITH M., 1998. *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage, paper 56, 300 p.
- CHOISNEL E., 1988, Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des données météorologiques. *La météorologie* **7** : 19-27.
- DELAROZIERE-BOUILLIN O., 1971, rapport 71 –SGN-173-HYD : Utilisation comparée des formules de Thornthwaite, Turc mensuel, Turc annuel et Penman, pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle et de l'évapotranspiration réelle moyenne.

- DUBREUIL P., 1974. *Initiation à l'analyse hydrologique*. Paris, Masson, 216 p.
- GLENN R.-H., 2012 : Estimation of Evaporation from Open Water-A Review of Selected Studies, Summary of U.S. Army Corps of Engineers Data Collection and Methods, and Evaluation of Two Methods for Estimation of Evaporation from Five Reservoirs in Texas, *U.S. Geological Survey*, Reston, Virginia, 107 p.
- HARJOABA I. & MALAISSE F., 1978. Le régime journalier des précipitations et les types de pluies à Lubumbashi. *Geo-Eco-Trop* **2**(4): 401-414.
- HOWELL T.A., STANER J.L., SCHNEIDER A.D. & EVETT S.R., 1995. Evapotranspiration of irrigated winter wheat - Southern High Plains. *Trans. A.S.A.E.* **38**(3): 745-759.
- HUFTY A., 1992, L'évapotranspiration réelle évaluée par sa complémentarité avec l'évaporation potentielle. In J. Perard (Ed.) & M. Dalby (Coll.) : *Contraintes géoclimatiques et environnement tropical, Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, **5**: 275-283.
- HUFTY A., 1976. Introduction à la climatologie. Paris, Presses Univ. France, 264 p.
- HUFTY A., 2001. Introduction à la climatologie. Le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine. Editions De Boeck Supérieur, 542 p.
- KALOMBO KAMUTANDA D., 2015. Caractérisation de la répartition temporelle des précipitations à Lubumbashi (sud-est de la RDC) sur la période 1970-2014. *Actes du XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Liège (Belgique), 531-536.
- MALAISSE F., 1974. Phenology of the Zambezi woodland area with emphasis on the miombo ecosystem. In H. Lieth (Ed.) : *Phenology and seasonality modeling*. Berlin-Heidelberg-New York, Springer Verlag, *Ecological Studies* **8** : 269-286.
- MALAISSE F. & KAPINGA I., 1987. The influence of deforestation on the hydric balance of soils in the Lubumbashi environment (Shaba, Zaire). *Bull. Soc. roy. Bot. Belg.* **119**(2): 161-178.
- MALAISSE F., MALAISSE-MOUSSET M. & SCHORCHOFF G., 1978. Contribution à l'étude de l'écosystème forêt claire (Miombo) – Note 23 : Analyse de la pluviosité à Lubumbashi et dans ses environs immédiats. *Geo-Eco-Trop* **2**(3) : 301-315.
- PENMAN H.-L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. Lond., A*, **193**: 120-145.
- RIOU C., 1975. *La détermination pratique de l'évaporation, application à l'Afrique centrale*. Paris, Mémoire Orstom n°80, 228 p.
- ROSENBERRY D.-O., WINTER T.-C., BUSO D.-C. & LIKENS G.-E., 2007. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *Journal of Hydrology* **340** : 149-166.
- REMIERAS G., 1965. *L'Hydrologie de l'Ingénieur*. Paris, A. Colin, 451 p.
- SEGUIN B., 1975. Influence de l'évapotranspiration régionale sur la mesure locale d'évapotranspiration potentielle. *Agric. Meteor.* **15**: 355-370.
- THORNTHWAITE C.W., 1948. *An approach toward a rational classification of climate*. *Geog. Rev.* **48**: 55-94.
- THORNTHWAITE C.W. & MATHER J.R., 1955. *The water balance*. Centerton (N.J., U.S.A.), Drexel Institute of Climatology, Laboratory of Climatology, **8**(1), 104 p.