

**Calcul de l'ETP PENMAN-
MONTEITH à différents pas de
temps sur quatre sites du Haut
Bassin de l'Ouémé**

Sylvain M. Djikou

Juillet-septembre 2006

Encadrant : S. Galle

Introduction

Dans le cadre de la préparation d'un sujet pour ma thèse de doctorat, j'ai effectué un stage à l'IRD. Je me suis intéressé au calcul des Evapotranspirations potentielles (ETP) à partir des données météorologiques de certaines stations synoptiques du Bénin et certaines stations météorologiques installés à Djougou et ses environs dans le cadre du projet AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine).

Ces travaux sur le calcul des ETP se dérouleront comme suit :

Au prime abord, la présentation de l'institution d'accueil, en suite le bilan d'énergie, la définition de l'ETP, formule générale de PENMAN-MONTEITH et hypothèses ; formules et données nécessaires pour les différents pas de temps (horaire, décadaire, journalier et mensuel) ; jeu de données disponibles au Bénin, critiques des données, calcul de l'ETP sur les sites, comparaison des ETP et enfin la conclusion générale.

Présentation

L'institution d'accueil est l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ; c'est un établissement public français à caractère scientifique et technique, placé sous la double tutelle des ministères chargés de la Recherche et de la Coopération. Il intervient dans une cinquantaine de pays (en Afrique, en Amérique du Sud ...)

L'IRD s'est donné quatre missions fondamentales :

- La recherche
- L'expertise et la valorisation
- Le soutien et la formation
- L'information scientifique.

Ces programmes scientifiques sont centrés sur les relations entre l'homme et son environnement dans les pays du Sud pour contribuer à leur développement. Ces derniers sont réalisés en partenariat par 83 unités de recherche et de service appartenant à trois départements scientifiques.

Les recherches sont conduites en liaison avec les institutions d'enseignement supérieur et de recherche française et avec ses partenaires des pays Sud.

Il faut noter que le personnel de l'institution en 2005 s'élève à 658 agents regroupant des chercheurs, des ingénieurs et techniciens dont 496 basés à Montpellier, le siège de l'institution. Au cours de l'année 2005 l'IRD a accueilli 457 personnes dont 48% originaires de pays étrangers, 382 d'entre eux en formation diplômante et 56 en échanges scientifiques ; de même 165 doctorants dont 67% originaires de pays du Sud.

Le budget de l'institution de l'année 2006 s'élève à 190 M d'euros. (IRD, 2006).

Evaluation de l'évapotranspiration

I – Bilan d'énergie

En partant des échanges d'énergie sur la surface d'une végétation, on peut estimer l'évapotranspiration par échange d'énergie sur le couvert végétal et limitée par la quantité d'énergie disponible. En raison de cette limitation, il est possible de prévoir le taux d'évapotranspiration en appliquant le principe de la conservation d'énergie. Ainsi l'énergie arrivant à la surface doit être égale à l'énergie partant de la surface pour la même période de temps.

Le bilan énergétique pour une surface d'évaporation se présente comme suit :

$$R_n = G + \lambda.ET + H \quad (1)$$

Où :

R_n est le rayonnement net,

H , la chaleur sensible,

G , le flux de chaleur dans le sol,

λET , la chaleur latente.

Les divers termes au niveau de (1) peuvent être positifs ou négatifs ; si R_n est positif, G est positif ; λET et H enlèvent l'énergie de la surface.

L'équation (1) peut être appliquée à une grande étendue surface de végétation homogène.

La chaleur latente λET représente l'évapotranspiration et peut être déduit de l'équation bilan énergétique si tous les composants sont connus. Le rayonnement net (R_n) et le flux de chaleur dans le sol (G) peuvent être mesurés ou estimés à partir des paramètres climatiques ; les mesures de la chaleur sensible (H) sont complexes et ne peuvent pas être facilement obtenues. La chaleur exige la mesure précise des gradients de température au-dessus de la surface.

Pour estimer H on utilise la méthode de transfert de masse qui se caractérise par le mouvement vertical de l'air au-dessus d'une grande surface homogène. Ces mouvements d'air transportent de la vapeur d'eau et de l'énergie vers la surface d'évaporation. Le taux d'évapotranspiration peut être calculé à partir des gradients verticaux de la température de l'air et de la vapeur d'eau d'une part ou d'autre part des gradients de vitesse du vent et de la vapeur d'eau. (Allen et al, 1998)

II - Définition de l'ETP

- L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant. La valeur limite de l'ETP est fonction de l'énergie disponible. (J. Margat, 1997).
- L'évapotranspiration est un phénomène complexe qui non seulement résulte de processus physiques tels que le potentiel efficace du sol, les changements d'état de l'eau, la diffusion moléculaire ou turbulente de la vapeur d'eau, elle peut aussi être soumise à la régulation stomatique, la surface foliaire ou le développement radical. La mesure de l'évapotranspiration aura de réelle signification que si les systèmes mis en œuvre, d'une part reflètent fidèlement les aspects de l'environnement : sol, végétation, atmosphère et d'autre part éliminent les effets restrictifs des contraintes biologiques. Le dispositif utilisé devra donc reconstituer le profil pédologique local, utiliser un couvert végétal dense ; uniforme et toujours en pleine croissance et enfin contenir en permanence une réserve hydrique voisine de la capacité au champ de l'échantillon de sol. (P. BROCHET et al, 1974).

III – Formule générale de PENMAN- MONTEITH

La formule de PENMAN – MONTEITH est une combinaison du bilan énergétique et de la méthode de transfert de masse. Parmi les différentes méthodes de calcul des ETP, elle est recommandée par la FAO (Allen et al, 1998). Cette formule brute se présente comme suit :

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_w - e)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2)$$

R_n : rayonnement net

G : flux de chaleur du sol

ρ_a : densité moyenne de l'air

c_p : chaleur spécifique d'air

λ : chaleur latente de changement d'état (2450 kJ.kg⁻¹)

e : tension de vapeur à la température t

e_w : tension de vapeur saturante à la température t

Δ : la pente de la courbe de tension de vapeur saturante

r_a : la résistance aérodynamique

r_s : la résistance du couvert végétal

γ : la constante psychrométrique

La résistance aérodynamique a pour formule :

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \cdot \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_z} \quad (3)$$

z_m : la hauteur de la mesure du vent (m)

z_h : la hauteur la mesure de l'humidité (m)

d : hauteur initiale de déplacement (m)

z_{om} : hauteur initiale de transfert du vent (m)

z_{oh} : hauteur initiale de transfert de la chaleur et de la vapeur (m)

$k = 0,41$: constante de von Karman's

u_z : la vitesse du vent à l'altitude z (m/s)

En considérant le vent, l'humidité et la vitesse du vent mesurés à 2m par rapport au sol et une végétation de 0,12 m de hauteur (Allen et al. 1998), l'expression de (3) se simplifie :

$$r_a = \frac{208}{v} \quad (4)$$

v : la vitesse du vent mesurée à 2m ($m.s^{-1}$)

La résistance du couvert végétal a pour formule :

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad (5)$$

r_s : la résistance du couvert végétal ($s.m^{-1}$)

r_l : la résistance stomacale de la feuille bien illuminée ($s.m^{-1}$)

LAI active : indice foliaire de la feuille.

Pour un gazon bien irrigué de hauteur 12 cm, on aboutit à :

$r_s \approx 70 s.m^{-1}$ le jour et $700 s.m^{-1}$ la nuit lorsque la radiation solaire incidente est inférieure à $10 W.m^{-2}$.

1. Formule horaire de PENMAN – MONTEITH

Pour une échelle de temps horaire, et un gazon bien irrigué, l'équation de Penman – Monteith FAO donne une Evapotranspiration de référence (ET_0) :

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) \cdot d + \gamma \frac{37}{t + 273} v (e_w - e)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{208} v \right)} \quad (6)$$

ET_0 évapotranspiration de référence (mm/h),

R_n rayonnement net ($W \cdot m^{-2}$),

G flux de chaleur du sol ($W \cdot m^{-2}$),

d : longueur du pas de temps en k secondes ($d=3.6 \cdot 10^{-3}$ ks)

t température moyenne horaire de l'air ($^{\circ}C$),

Δ pente de la courbe de la tension de vapeur saturante ($kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$),

γ Constante psychrométrique ($kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$),

e tension de vapeur à la température t (kPa),

e_w tension de vapeur saturante (kPa),

v vitesse moyenne du vent à 2 m ($m \cdot s^{-1}$).

Les hypothèses:

- La végétation est un gazon bien irrigué et couvrant à une hauteur de 0,12m, de résistance extérieure de $70 s \cdot m^{-1}$ et un albédo de 0,23.
- Le flux de la chaleur dans le sol G n'est pas négligeable pour des calculs horaires de l'ETP.
- Les données météorologiques exigées sont : la température horaire moyenne de l'air, l'humidité relative horaire moyenne, vitesse horaire moyenne mesurée à 2m, le rayonnement net horaire. (Allen et al, 1998)

Les paramètres intervenant dans le calcul de l'ETP de PENMAN – MONTEITH proviennent :

- a) de mesures directes sur le terrain pour t , R_n et v ;
- b) d'estimations de e_w , e et G en utilisant les formules :

$$e_w(t) = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot t}{t + 237,3}\right) \quad (7)$$

$$e = \frac{H_r \times e_w(t)}{100} \quad (8)$$

Avec e_w et e en kPa, (H_r) humidité relative moyenne horaire en (%) et (t) température moyenne horaire en ($^{\circ}\text{C}$).

Le flux de chaleur horaire dans le sol (G) est fonction du rayonnement net (R_n) :

- $G = 0,1 \cdot R_n$ durant la journée ($\text{Rad} > 0$) (9)
- $G = 0,5 \cdot R_n$ durant la nuit ($\text{Rad} = 0$) (10)

- c) de constantes physiques : γ , Δ :

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P \quad (\gamma \text{ en kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}) \quad (11)$$

NB: La pression est enregistrée sur les sites ou peut être calculée par la formule :

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293}\right)^{5,26} \quad (12)$$

(P en kPa, z l'altitude en m)

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot t}{t + 237,3}\right)\right]}{(t + 237,3)^2} \quad (\Delta \text{ en kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}, t \text{ en } ^{\circ}\text{C}) \quad (13)$$

2. Formule de Penman – Monteith pour le calcul de l'ETP journalier.

Lorsqu'on ne dispose que de données journalières on peut calculer l'évapotranspiration de référence à l'aide de la formule suivante, dérivée l'équation de Penman – Monteith (2). Cette équation est celle de la FAO (1998)

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot R_n \cdot d + \gamma \frac{900}{t + 273} v (e_w - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34v)} \quad (14)$$

ETP évapotranspiration potentielle ($\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$),

R_n rayonnement net ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$),

d : longueur du pas de temps en k secondes ($d=0.0864$ ks)

t_{moy} température moyenne quotidienne de l'air à 2m ($^{\circ}\text{C}$),

Δ pente de la courbe de la tension de vapeur saturante ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$),

γ Constante psychrométrique ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$),

e tension de vapeur (kPa),

e_w tension de vapeur saturante (kPa),

v vitesse du vent à 2m ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Les hypothèses:

- La végétation est un gazon bien irrigué et couvrant à une hauteur de 0,12m, de résistance extérieure de $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ et un albédo de 0,23.
- Le flux de la chaleur quotidien dans le sol est considéré comme négligeable devant le rayonnement net à ce pas de temps ($G \approx 0$)
- Les paramètres climatiques exigés : les températures journalières moyenne, maximale et minimale ; la vitesse journalière moyenne de l'air à 2m ; le rayonnement net total journalier. (Allen et al, 1998)

Les paramètres intervenant dans le calcul de l'ETP journalier de PENMAN – MONTEITH proviennent :

- a) de mesures directes sur le terrain pour t_{moy} , R_n et v ;
- b) de mesures indirectes pour e_w et e :

L'utilisation de température moyenne sous estime e_w , on lui préfère l'expression suivante :

$$e_w = \frac{e_w(t_{\text{max}}) + e_w(t_{\text{min}})}{2} \quad (15)$$

e_w tension de vapeur saturante de la journée (kPa)

t_{max} température maximale au cours de la journée (°C)

t_{min} température minimale au cours de la journée (°C)

$$e = \frac{e_w(t_{\text{min}}) \cdot \frac{Hr_{\text{max}}}{100} + e_w(t_{\text{max}}) \cdot \frac{Hr_{\text{min}}}{100}}{2} \quad (16)$$

e tension de vapeur réelle de la journée (kPa)

$e_w(t_{\text{max}})$ tension de vapeur saturante à la température journalière maximale (kPa)

$e_w(t_{\text{min}})$ tension de vapeur saturante à la température journalière minimale (kPa)

Hr_{max} humidité relative maximale (%)

Hr_{min} humidité relative minimale (%)

- c) de constantes physiques : γ , Δ

Les formulations sont identiques au pas de temps horaire. On utilise t_{moy} température moyenne journalière (°C) pour le calcul de Δ .

3. Formule décadaire.

Au pas de temps décadaire, on utilise les formules (13), (14) et (16) avec les variables suivantes :

d : longueur du pas de temps en k secondes (d=0.864 ks)

t_{\max} , t_{\min} : moyenne décadaire des températures maximum (minimum) journalières

$$t_{moy} = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} \quad (17)$$

Hrmax, Hrmin : moyenne décadaire des Humidités relatives maximum (minimum) journalières

Le flux de chaleur dans le sol est négligé

$$G_{10 \text{ jours}} \approx 0 \quad (18)$$

4. Formule mensuelle.

Au pas de temps mensuel, on utilise les formules (13) , (14) et (16) avec les variables suivantes :

d : longueur du pas de temps en k secondes (d=0.0864*nb jours ks)

t_{\max} , t_{\min} : moyenne mensuelle des températures maximum (minimum) journalières

$$t_{moy} = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}$$

Hrmax, Hrmin : moyenne mensuelle des Humidités relatives maximum (minimum) journalières

Le flux de chaleur mensuel dans le sol (G) n'est pas nul. On peut l'approcher par :

$$G_i = 0,07.(t_{i+1} - t_{i-1}) \quad (19)$$

Ou bien lorsqu'on ne dispose pas de (t_{i+1}), on utilise l'expression :

$$G_i = 0,14.(t_i - t_{i-1}) \quad (20)$$

t_i température moyenne mensuelle de l'air du mois i (°C)

t_{i-1} température moyenne mensuelle de l'air du mois précédent (°C)

t_{i+1} température moyenne mensuelle de l'air du mois prochain (°C).

IV - Les données disponibles au Bénin.

Dans le cadre du projet AMMA, des appareils ont été installés dans la région de Djougou et ses environs, je veux nommer les stations de Bira, de Nalohou, de Béléfoungou et Djougou.

A Djougou, on dispose de capteurs placés à 2.3m au dessus du sol pour enregistrer toutes les quinze minutes, la vitesse et la direction du vent, l'humidité relative, la pression atmosphérique, la température de l'air, la hauteur de la pluie, les rayonnements net et incident.

Dans la forêt de Béléfoungou, les mêmes variables qu'à Djougou sont enregistrées toutes les trente minutes. Les appareils de mesure sont placés sur une plateforme à 5.5m au dessus du sol. Cette plateforme est située en dessous du sommet des arbres (environ 8-10 m de hauteur).

A Bira et Nalohou, les stations sont plus complètes. On mesure les mêmes variables toutes les trente minutes mais on y a ajouté des appareils de mesure des rayonnements incidents et réfléchis pour les longueurs d'ondes courtes (LW_{in} et LW_{out}) et longues (SW_{in} et SW_{out}). On en déduit le rayonnement net (R_n), mais aussi l'albédo (α) et les bilans courte et grande longueur d'onde par exemple.

$$R_n = SW_{in} - SW_{out} + LW_{in} - LW_{out} \quad (21)$$

$$\alpha = SW_{out}/SW_{in} \quad (22)$$

Equipement des stations étudiées

<i>STATION DE DJOUGOU</i>				
variables		Appareils marque et type	Gamme de mesure	Précision
Vent 2.3 m	Vitesse (v)	R.M. Young (05103) Wind monitor	1 à 60 m.s ⁻¹	± 0,3 m.s ⁻¹
	Direction (d)		60 à 100m.s ⁻¹	± 1m.s ⁻¹
			0 à 360° mécaniques,	± 3°
Pression (P)		Druck RPT410F Barometric Pressure	600 à 1100 hPa (-10°C à 50°C)	± 0,5 hPa
Temperature (t)		Vaisala HMP45C Temperature and RH	-39,2°C à 60°C	± 0,2°C à 20°C ± 0,3°C à 40°C
Humidité relative (Hr)		Probe	0,8 à 100%	± 2% 0 à 90% ± 3% 90 à 100%
Rayonnement net (Rn)		Kipp & Zonen NR- Lite Net radiometer	-200 à 1500 W.m ⁻² 0,2 à 100µm	± 0.7 W m ⁻²
Radiation incidente (Rad)		Kipp & Zonen SP – Lite silicon pyranometer	0 à 1500 W.m ⁻² 0,4 à 1,1µm.	3% soit par ex : 1000 ± 30 W m ⁻²
Pluviomètre (CATCH network)		Précis Mécanique 30305 tipping bucket raingauge 400cm ² , 1.2 m high	Rainfall height Rainfall intensity 0-250 mm h ⁻¹ 250-500 mm h ⁻¹	0.5 mm 1% 3%

STATION DE BELEFOUNGOU

variables		Appareils marque et type	Gamme de mesure	Précision
Vent 5.5 m	Vitesse (v)	Vaisala WXT510	0 à 35 m.s ⁻¹ 36 à 60 m.s ⁻¹	Max (± 3%; 0.3ms ⁻¹) ± 5%
	Direction (d)	Ultrasonic wind sensor	0 à 360°	± 2°
Pression (P)		Vaisala WXT510	600 hPa à 1100 hPa (-52°C à 60°C)	± 0,5 hPa ; 0°C à 30°C ± 1 hPa ; -52°C à 60°C
Temperature (t)		Vaisala WXT510	-52°C à 60°C	± 0,3°C à 20°C
Humidité relative (Hr)				0 à 100%
Rayonnement net (Rn)		Kipp et Zonen NR- Lite Net radiometer	-200 à 1500 W.m ⁻² 0,20 à 100µm	± 0.7 W m ⁻²
Radiation incidente (Rad)		Skye Instruments SP1110 pyranometer Sensor	0.35µm à 1.10µm -30°C à 70°C	± 5%, typically <±3% soit par ex 1000 ± 30 W m ⁻²
Pluviométrie 1		Vaisala WXT510 Rain drop impactor 60 cm ² area, 5.5 m high	Rainfall height Rainfall duration Rainfall intensity 0-200 mm h ⁻¹ Hail	5% 10 s (resolution) 0.1 mm h ⁻¹ (resolution) 0.1 hit cm ⁻²
Pluviométrie 2		RIMCO 7499 tipping bucket raingauge 324 cm ² , 5.5 m high	Rainfall height Rainfall intensity 0-250 mm h ⁻¹ 250-500 mm h ⁻¹	0.5 mm 1% 3%

Vaisala WXT510 : Multiparameter weather transmitter

STATIONS DE BIRA ET NALOHOU

variables		Appareils marque et type	Gamme de mesure	Précision
Vent 2 m	Vitesse (v)	Vaisala WXT510 Ultrasonic wind sensor	0 à 35 m.s ⁻¹	Max (± 3%; 0.3ms ⁻¹)
	Direction (d)		36 à 60 m.s ⁻¹	± 5%
			0 à 360°	± 2°
Pression (P)		Vaisala WXT510	600 hPa à 1100 hPa (-52°C à 60°C)	± 0,5 hPa ; 0°C à 30°C ± 1 hPa ; -52°C à 60°C
Temperature (t)		Vaisala WXT510	-52°C à 60°C	± 0,3°C à 20°C ± 0,4°C à 40°C
Humidité relative (Hr)			0 à 100%	± 3% ; 0 à 90% ± 5% ; 90 à 100%
Solar radiation (SWin, SWout)		Kipp & Zonen CNR1 2 CM3 pyranometers	0 – 1500 W m ⁻² 0.305 à 2.800 µm	Equal sensitivity for the four sensors ± 0.6 W m ⁻²
Far Infra Red radiation (LWin, LWout)		Kipp & Zonen CNR1 2 CG3 pyrogeometers PT-100 pyrg. temperature	-250 à 250 W.m ⁻² 5 à 50µm - 40°C à 70°C	(expected accuracy for daily sums: ± 10%) ± 2 K
Pluviométrie 1		Vaisala WXT510 Rain drop impactor 60 cm ² area, 2 m high	Rainfall height Rainfall duration Rainfall intensity 0-200 mm h ⁻¹ Hail	5% 10 s (resolution) 0.1 mm h ⁻¹ (resolution) 0.1 hit cm ⁻²
Pluviométrie 2		RIMCO 7499 Tipping bucket raingauge 324 cm ² , 30 cm high	Rainfall height Rainfall intensity 0-250 mm h ⁻¹ 250-500 mm h ⁻¹	0.5 mm 1% 3%

Vaisala WXT510 : Multiparameter weather transmitter

V - Critiques des données

Seule la station de Djougou ne présente pas de lacune pendant la période considérée, elle a donc été utilisée comme référence dans les graphes de corrélation présentés ci-dessous.

1. Température de l'air

Au cours de l'année, la température de l'air varie entre 15°C et 40°C sur le bassin versant de la Donga. On note une bonne corrélation entre les mesures effectuées sur les sites de Djougou, Bira, de Nalohou et de Béléfoungou (figure 1). Le coefficient de détermination sur ces trois sites tourne autour de $r^2=0,95$. On note un étalement du nuage pour les températures les plus basses.

A titre d'illustration, la décade présentée sur la figure 2 montre des températures de journée relativement proches entre les 4 sites avec des différences inférieures à 2°C, alors que certaines fin de nuit sont nettement plus froides sur les sites de brousse qu'à Djougou, situé au cœur de la ville et qui reste plus chaud d'environ 3-5°C. La dispersion est plus accentuée pour les températures les plus basses de fin de nuit.

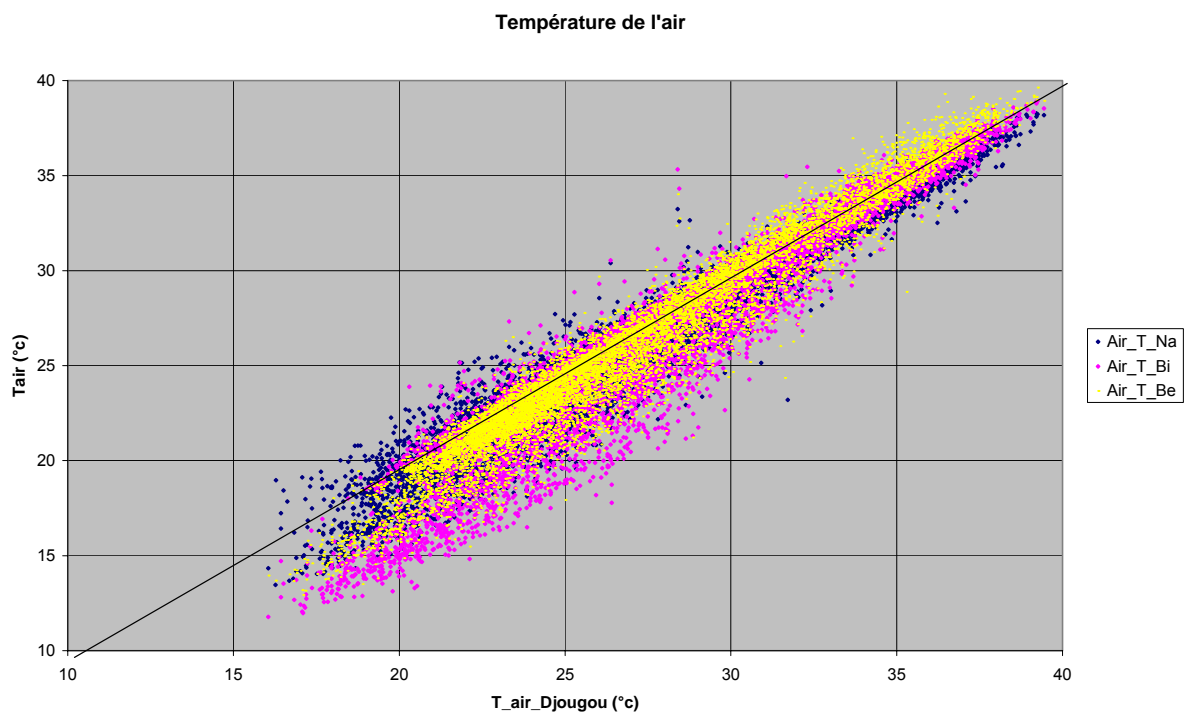


Figure 1 : corrélation des températures mesurées sur les 4 sites du bassin versant de la Donga

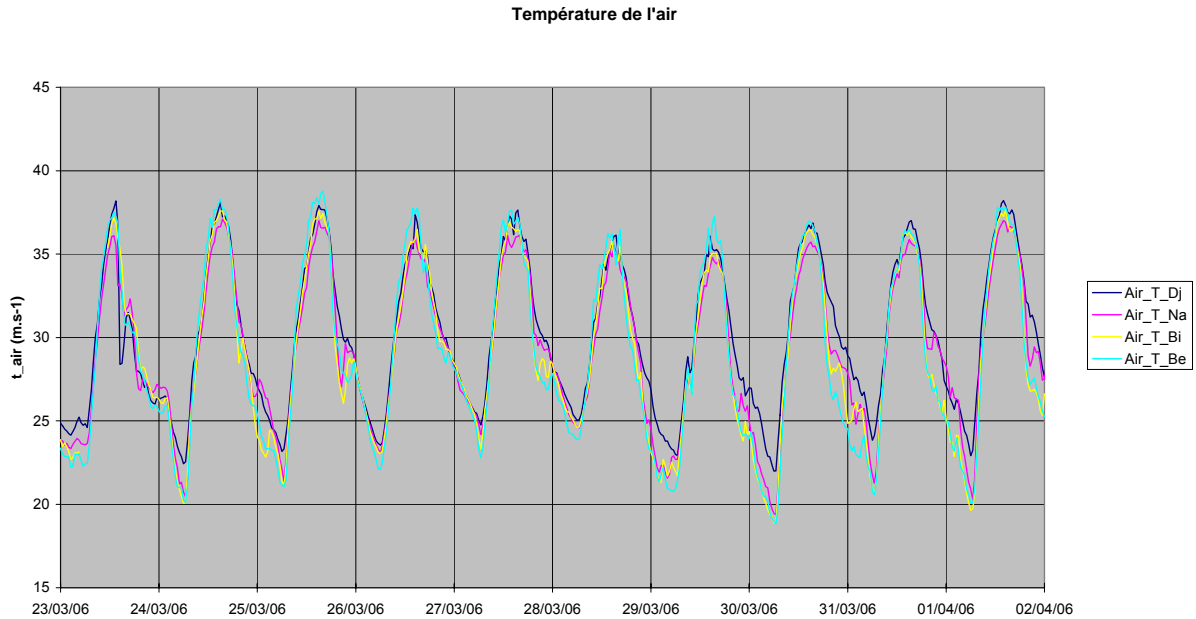


Figure 2 : évolution temporelle de la température sur le bassin versant de la Donga

2. Vitesse du vent

Durant la période étudiée (novembre 2005-aout 2006), le vent dépasse rarement 6 m/s, avec un maximum de 7.3 m/s à Djougou. La corrélation entre site est significative ($r^2=0.69$), mais on constate (Figure 3) que le vent varie nettement suivant les sites. Le site situé en forêt (Béléfougou) a un vent moyen nettement inférieur (0.5 m/s) que celui mesuré en savane arbustive (Bira : 0.9 m/s) ou en environnement urbain (cases, tour radar) qui bordent le site de Djougou (0.9 m/s). Le site le plus venteux est celui de Nalohou couvert de jachère herbeuse, peu haute durant cette période de l'année ($h < 50\text{cm}$), avec une moyenne de 1.4 m/s, soit près du triple du vent mesuré à Béléfougou. Le vent a un cycle journalier bimodal (Figure 4) : maximum vers midi, il diminue au lever et coucher du soleil (6h et 18h TU).

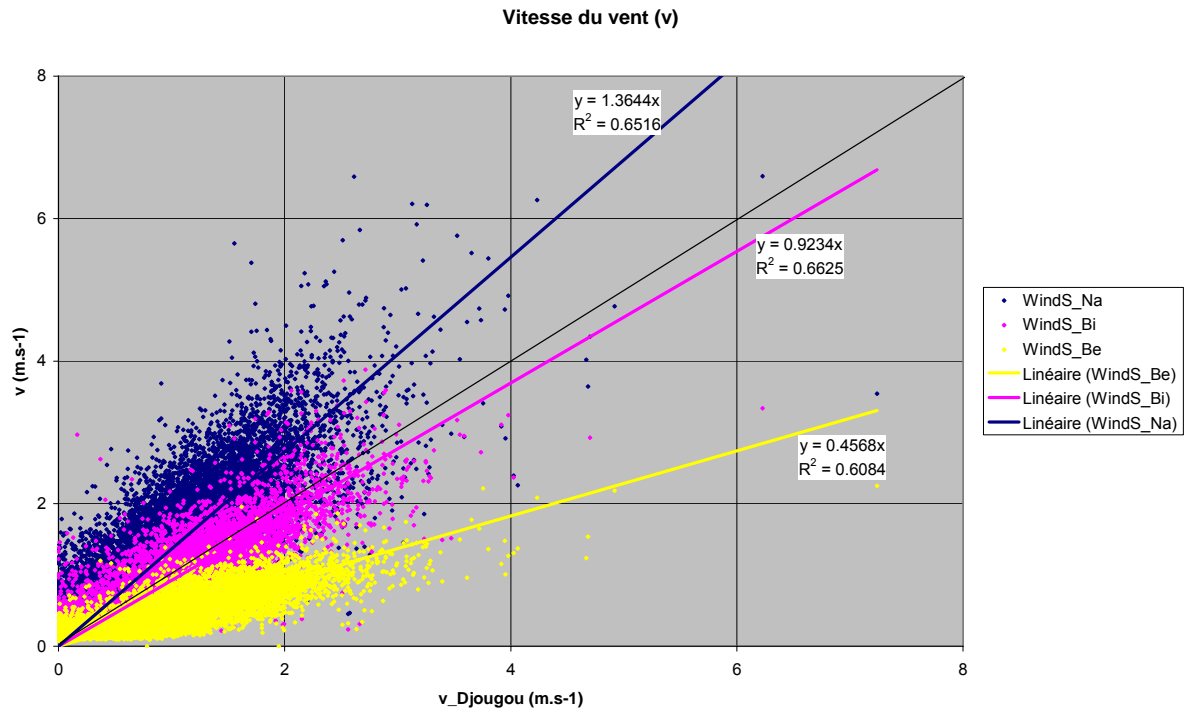


Figure 3 : corrélation des vitesses de vent mesurées sur les 4 sites

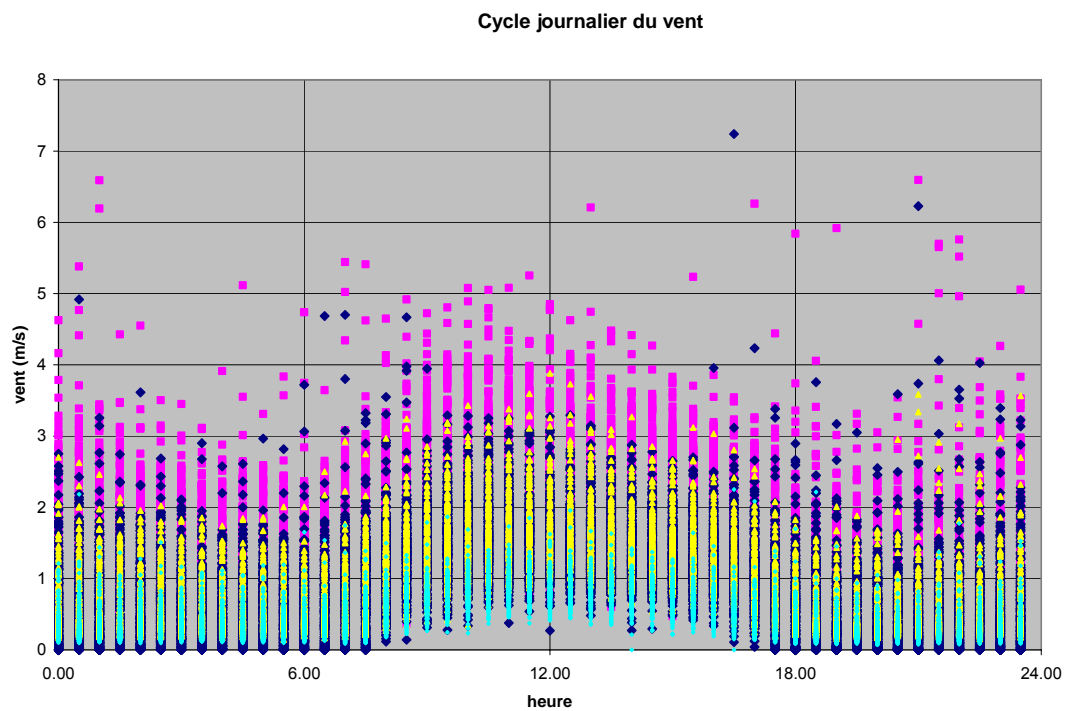


Figure 4 : cycle journalier du vent sur le bassin versant de la Donga

3. Humidité relative

Une bonne corrélation se dégage entre les mesures d'humidité relative sur les 4 sites (figure 5), le coefficient de corrélation moyen est de $r^2=0,94$. Cependant pour les fortes humidités, le site urbain de Djougou reste systématiquement plus sec que les autres. Le site de Bira est le moins bien expliqué par les mesures de Djougou.

On note sans l'expliquer que les capteurs semblent saturer à 96-97% d'humidité pour tous les sites (Figures 5 et 6).

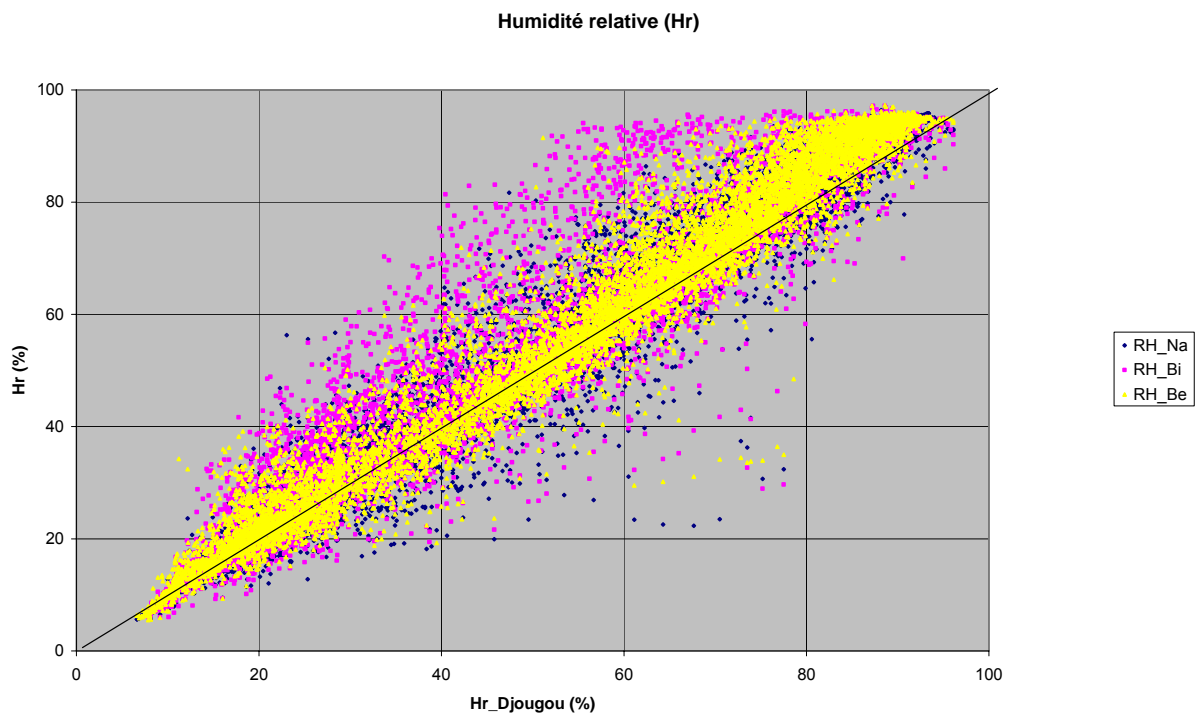


Figure 5 : corrélation des Humidité relative de l'air sur les 4 sites

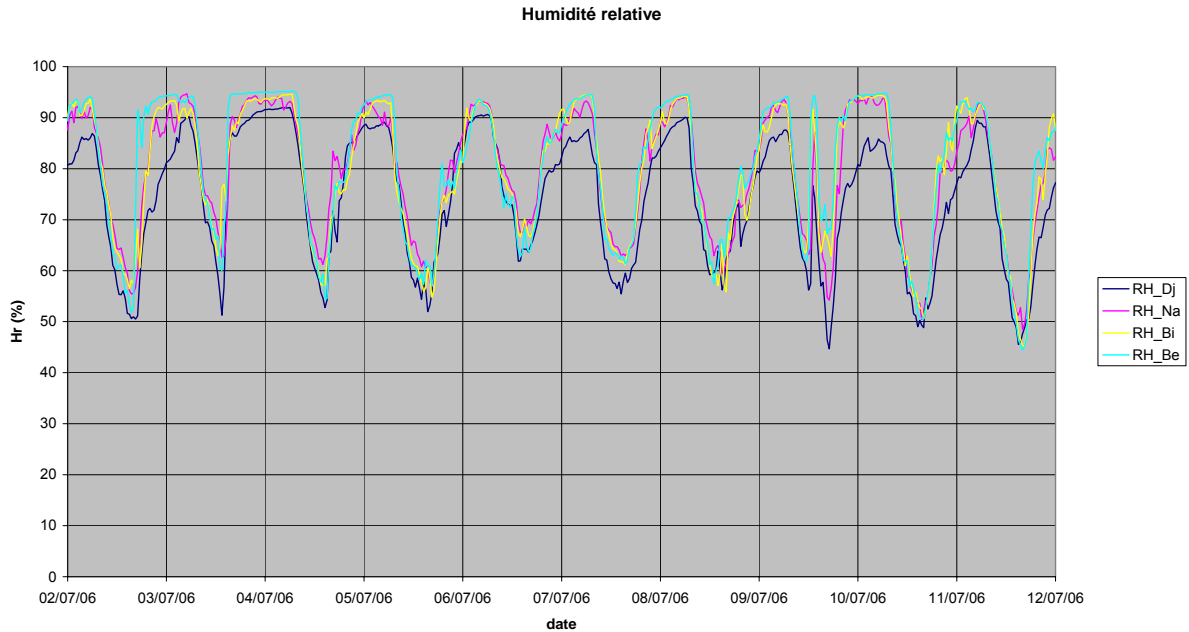


Figure 6 : évolution temporelle de l’humidité relative (HR) sur les 4 sites en juillet

4. Pression atmosphérique

Si on ramène la pression mesurée sur les 4 sites au niveau de la mer (tableau 1), la corrélation entre la pression atmosphérique mesurée sur l’ensemble des sites est très élevée ($r^2= 0,98$) et non biaisée (Figure 7). La différence de pression entre les stations ne dépasse jamais 1,2 hPa, ce qui correspond à la précision des mesures. Sur les 10 mois de mesure, seuls 3 points s’écloignent de la droite de régression. Il s’agit de pics de pression isolés (30 min) qui ne sont pas vus par toutes les stations. Les éventuelles lacunes de mesures peuvent être complétées de façon fiable par les mesures des stations avoisinantes, en prenant en compte leur différence d’altitude suivant le tableau 1 ci-dessous.

	Djougou	Nalohou	Bira	Béléfongou
altitude (m)	438	447	420	420
dP (hPa)	51.5	52.6	49.4	49.4

Tableau 1 : altitude des sites et correction par rapport au niveau de la mer (hPa) suivant l’équation (12).

Pression atmosphérique équivalente au niveau de la mer

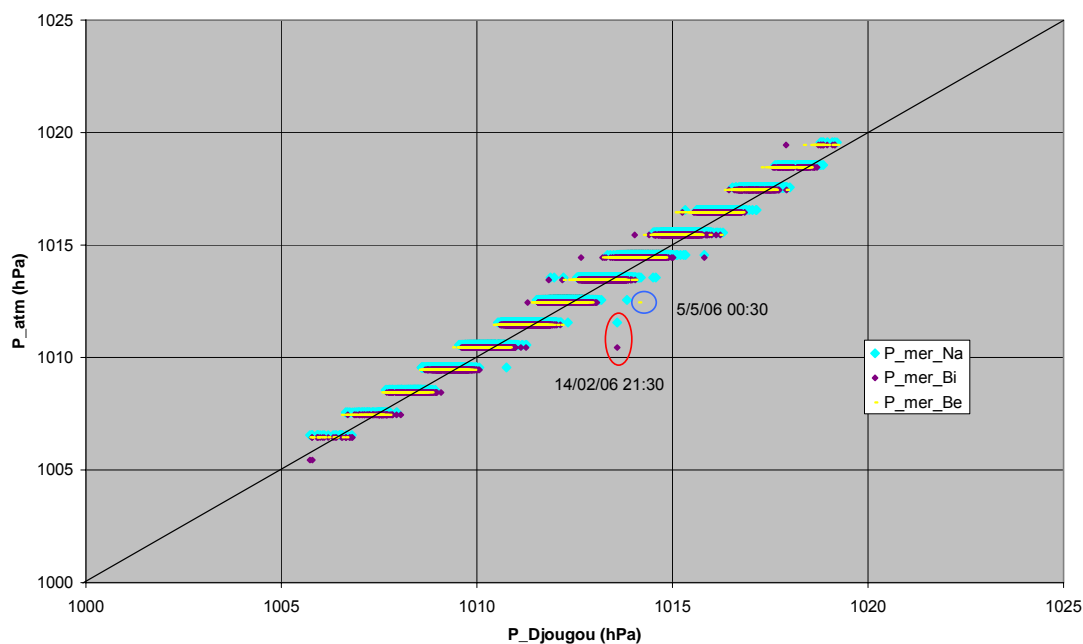


Figure 7 : corrélation des pressions atmosphériques ramenées au niveau de la mer

La pression, centrée sur 1012 hPa de novembre à avril en saison sèche, s'élève brusquement vers la mi-mai 2006 pour se situer autour de 1015 hPa en saison pluvieuse. La moyenne est de 1013 hPa pour la période observée (novembre- août). La pression à un cycle journalier bimodal décalé en toutes saisons (figure 8)

Pression atmosphérique à Djougou

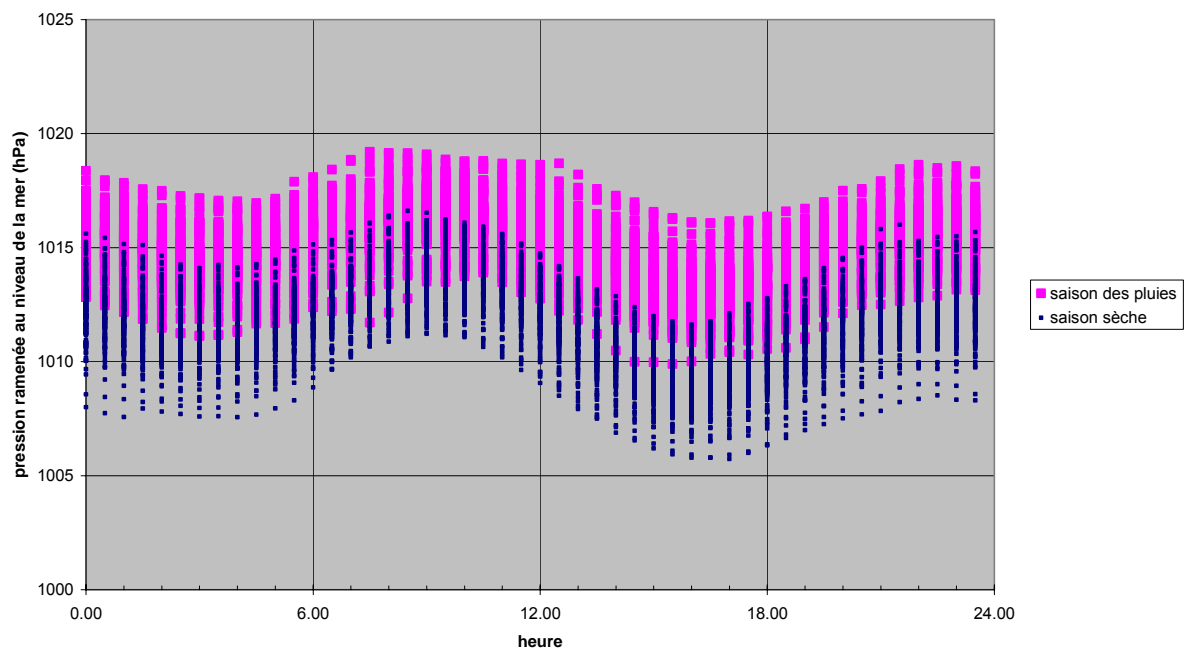


Figure 8 : cycle journalier de la Pression atmosphérique à Djougou

5. Radiation potentielle

La radiation potentielle (R_{so}) est la quantité maximale de rayonnement solaire qui peut atteindre la surface d'évaporation (le sol par exemple) par ciel clair à un instant donné. Elle dépend du rayonnement extrasolaire d'une part et de la masse atmosphérique d'autre part. Le rayonnement solaire atmosphérique (R_a) est une fonction astronomique du lieu et de la date. La masse atmosphérique détermine la fraction du rayonnement extrasolaire absorbée par l'atmosphère, elle est fonction notamment de l'altitude, des aérosols, de la vapeur d'eau. Il existe plusieurs fonctions pour estimer la masse atmosphérique en fonction des conditions locales.

Les différents sites d'études (Djougou, Nalohou, Bira et Béléfoungou) sont situés à basse altitude ($z < 6000\text{m}$) et se trouvent dans des régions peu polluées mais avec beaucoup d'aérosols durant les périodes d'Harmattan ; l'angle solaire varie entre 45° et 51° . En dehors des périodes d'Harmattan, on peut donc utiliser l'expression suivante pour le rayonnement solaire de ciel clair sur des périodes horaires comme quotidiennes est :

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) R_a \quad (23)$$

R_{so} radiation solaire potentielle (W m^{-2})

Z hauteur de la station (m)

R_a radiation solaire extra – terrestre (W m^{-2}).

L'expression de la radiation solaire extra – terrestre dépend du pas de temps.

a) pas de temps journalier :

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} \cdot d_r [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (24)$$

R_a : radiation solaire extra – terrestre ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$)

G_{sc} : constante solaire ($0,0820 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} = 1367 \text{W m}^{-2}$)

d_r : distance relative à terre et au soleil (rad), d'expression :

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (25)$$

ω_s : Angle d'heure du coucher de soleil (rad), d'expression :

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (26)$$

φ : latitude du lieu (rad)

δ : déclin solaire (rad), d'expression :

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (27)$$

J : nombre de jours dans l'année.

b) Au pas de temps horaire :

$$R_a = \frac{12 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))] \quad (28)$$

R_a : radiation solaire extra – terrestre ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)

ω_1 : angle solaire de temps (rad), d'expression :

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi \cdot t_1}{24} \quad (29)$$

ω_2 : angle solaire de temps (rad), d'expression :

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi \cdot t_1}{24} \quad (30)$$

t_1 : la durée de la période de calcul (1 pour une période de 1 heure et 0,5 pour 30 min)

ω : angle solaire de temps au point médian (rad), d'expression :

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0,06667 \cdot (L_z - L_m) + S_c) - 12] \quad (31)$$

t : temps standard au point médian (pour une période de 14,00 à 15,00h, t = 14,5)

L_z : longitude du centre du fuseau horaire local ($^\circ$ à l'ouest de Greenwich).

L_m : longitude du site de mesure ($^\circ$ à l'ouest de Greenwich).

S_c : correction saisonnière pendant le temps solaire (heure)

6. Radiation incidente

Il existe une bonne corrélation entre les mesures de radiations incidentes sur les sites de Djougou, Bira, Nalohou et de Béléfoungou (figure 9). Le coefficient de corrélation moyen entre les sites est de $r^2=0,94$. A Béléfoungou on note une surestimation systématique des fortes valeurs par rapport aux autres sites. Après comparaison avec l'insolation potentielle

calculée en fonction du jour et de la latitude (équation (23)), on peut constater sur une journée bien ensoleillée comme le 25/2/06 (figure 10) que Béléfoungou dépasse les valeurs maxima attendues. Une réduction de 10% a été appliquée afin d'obtenir une corrélation non biaisée avec Nalohou et Bira qui sont équipées de CNR1 et donc considérées comme stations de référence. Béléfoungou est le seul site équipé d'un radiomètre Skye. Sa relation d'étalonnage est à vérifier.

Si on regarde l'évolution annuelle du rayonnement (figure 11), on constate que de décembre à mi-février, le rayonnement mesuré n'atteint jamais l'insolation potentielle bien que les journées soient ensoleillées, sans doute à cause des aérosols et de l'épaisseur optique en période d'harmattan. Une prise en compte de la masse atmosphérique est possible grâce à l'ORE AMMA-Photon (<http://www-loa.univ-lille1.fr/photons/>) qui a une station « Djougou 355 » située sur le bassin versant de la Donga. Cette étude n'a pas encore été faite.

En saison pluvieuse au contraire, la radiation solaire mesurée dépasse parfois R_{so} pour des heures isolées. Ces valeurs peuvent être l'indication d'un mauvais fonctionnement du pyranomètre. Comme ces dépassements sont rares (30 cas/900 mesures), et qu'ils ne dépassent pas 10% de Rad, ce qui correspond à la précision attendue, les mesures concernées n'ont pas été corrigées. La proportion de dépassement est maximale pour Djougou (2/3).

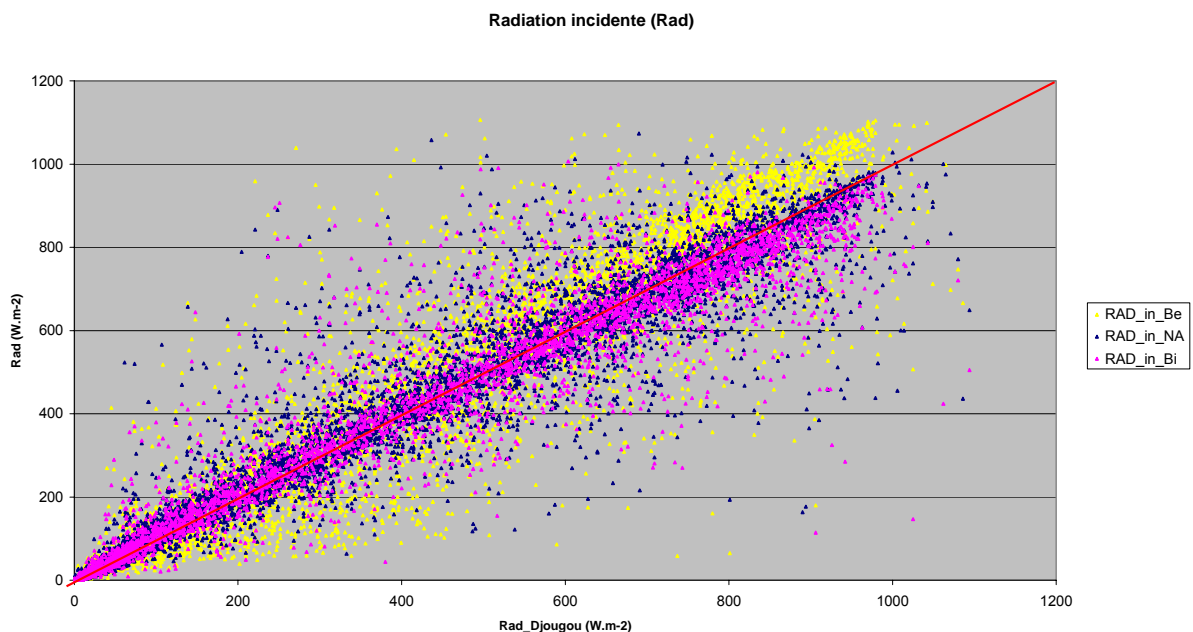


Figure 9 : corrélation du Rayonnement solaire incident sur les 4 sites

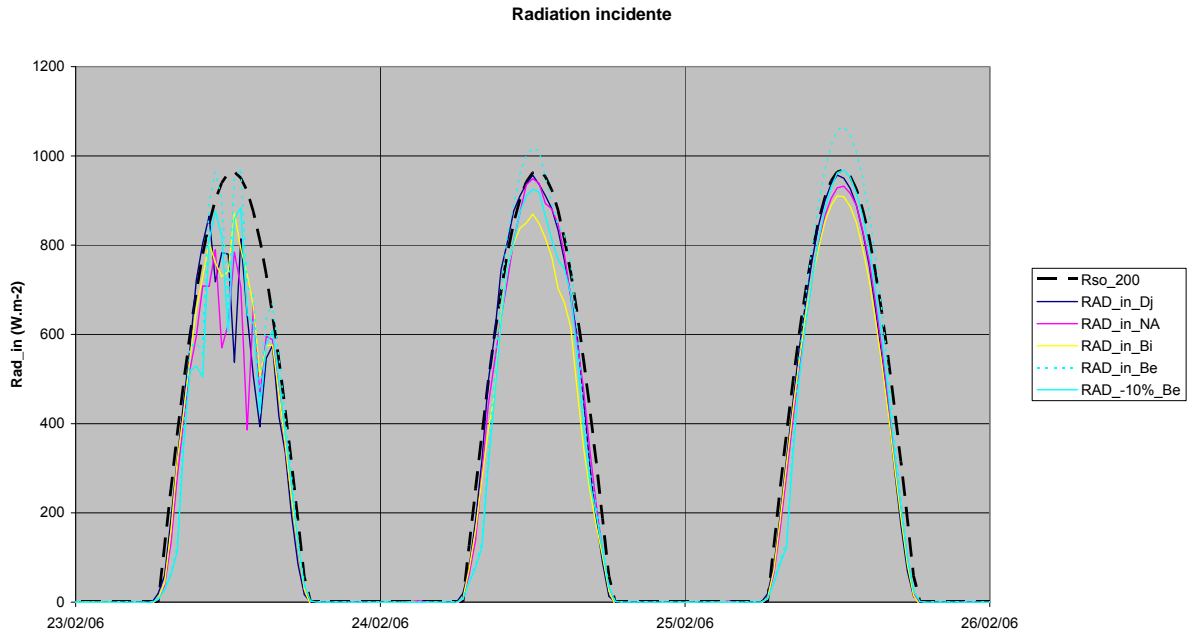


Figure 10 : évolution temporelle du rayonnement solaire incident sur les 4 sites

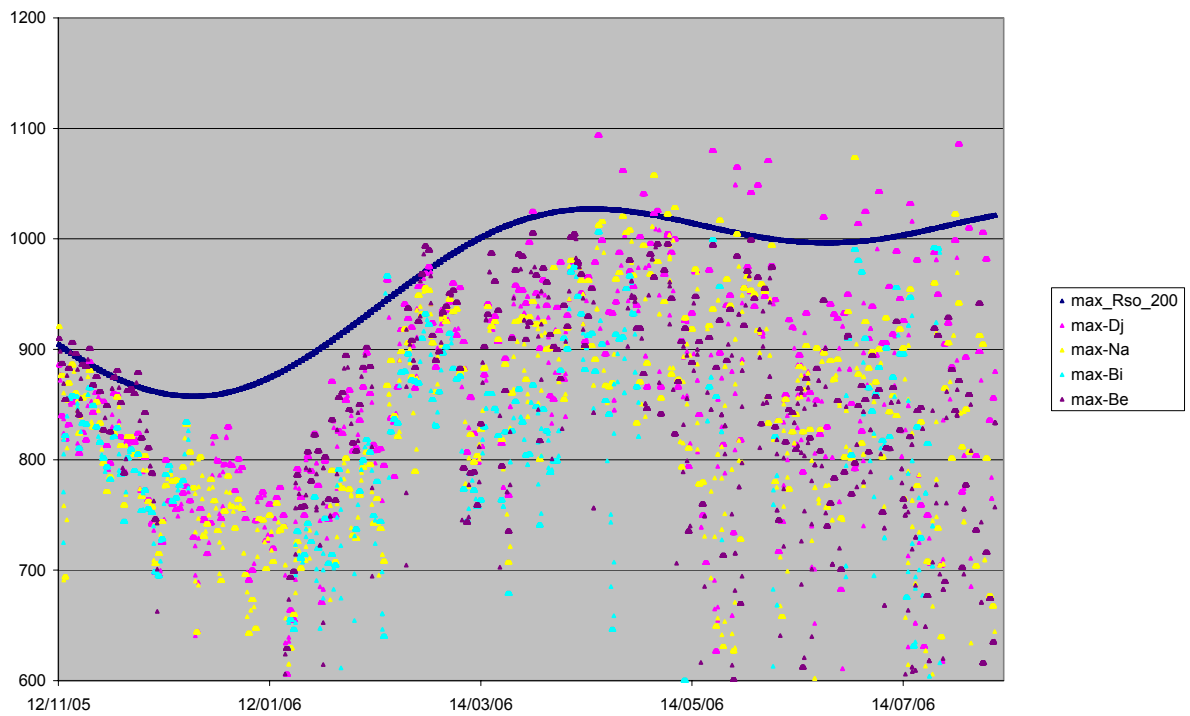


Figure 11 : valeur max journalière du rayonnement incident mesuré et potentiel

7. Rayonnement net

La corrélation entre les mesures de rayonnement net sur les 4 sites (figure 12), montre une plus grande dispersion que pour le rayonnement solaire incident. A la variabilité du rayonnement incident s'ajoute ici la différence de couvert végétal qui induit des températures

et des albedos différents ce qui joue sur le rayonnement net. Le coefficient de détermination moyen est de $r^2=0,86$.

Le rayonnement net à Djougou est systématiquement plus fort pour les fortes valeurs ($R_{net}>400W/m^2$) et légèrement plus faible durant la nuit ($R_{net}<0W/m^2$). Les valeurs du rayonnement net inférieures à -200 mm mesurées à Djougou (3 valeurs) ont été supprimées car sans sens physique. Elles correspondent à de brusques chutes du rayonnement net (-700W/m² en une demi-heure).

La valeur mesurée est sensible à la propreté de l'appareil comme on peut le voir sur la figure 13. Le rayonnement net augmente de pratiquement 200 w/m² le 15 février après une pluie de 30 mm qui a lavé les appareils. Cette remarque est également valable à Djougou où la consigne de nettoyage doit être répétée à l'observateur de la DMN.

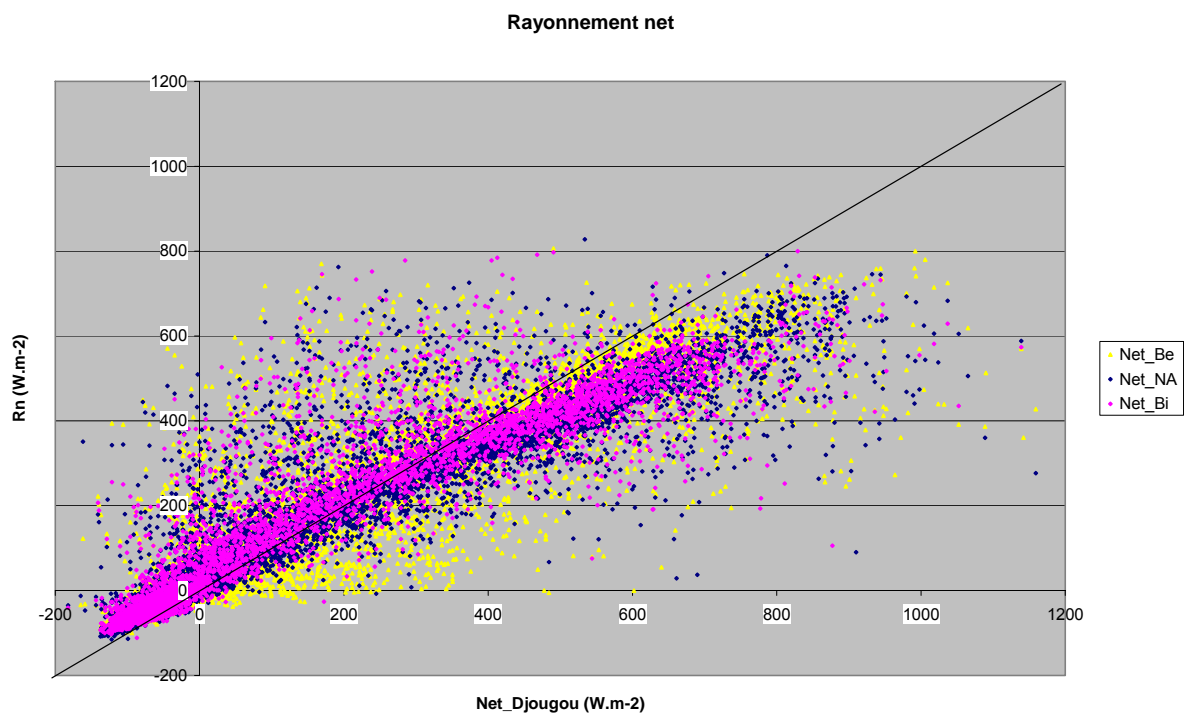


Figure 12 : corrélation du rayonnement net mesuré sur les 4 sites

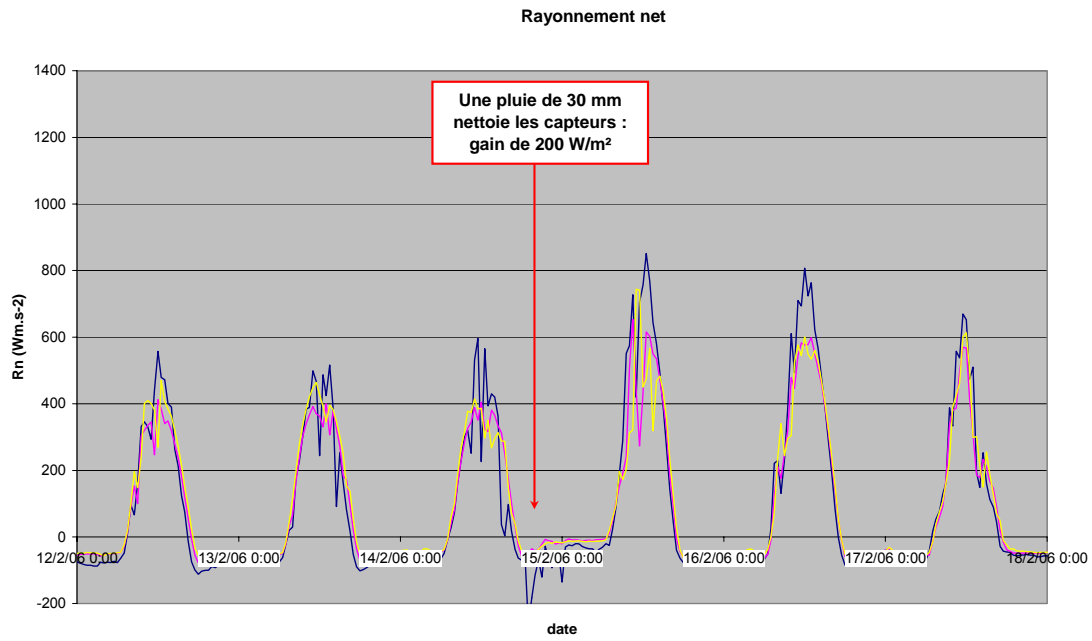


Figure 13 : impact de la propreté du capteur sur la mesure de Rnet

VI - Calcul de l'ETP sur les sites.

Connaissant les différents paramètres intervenant dans le calcul de l'ETP sur les quatre sites étudiés (Djougou, Nalohou, Bira et Béléfoungou), nous avons utilisé les feuilles de calcul d'Excel, pour déterminer l'évapotranspiration horaire et journalière en utilisant les formules de Penman – Monteith recommandées par la FAO (formules (6) et (14)).

En ce qui concerne le calcul de l'ETP journalière, nous avons utilisés deux méthodes : La première méthode consiste à faire la somme des ETP horaires sur une période de 24 heures pour avoir l'ETP journalière et la deuxième méthode est l'utilisation directe de la formule de Penman – Monteith pour l'ETP journalier (formule (14)).

VII - Comparaison des ETP.

a. ETP horaire

D'après la figure 13, on constate que les valeurs d'évapotranspiration horaire sur chaque site varient de -0.11 à 1 mm h-1. Les points sont situés de part et d'autre de la médiane mais relativement éparpillés. La corrélation est de $r^2=0.92$, ce qui signifie que 92% de la variance de Nalohou, Bira ou Belefoungou est expliquée par l'ETP de Djougou. On note une tendance à la surestimation (+15%) des fortes ETP par la station de Djougou (ici notre référence) associée à une sous-estimation des valeurs faibles ($ETP < 0.5$ mm h-1). Cette tendance est directement liée à celle de R_n de Djougou évoquée plus haut. Pour mémoire, les stations de Nalohou et Bira équipées des mêmes appareils et entourées de végétation ont une corrélation de $r^2=97\%$ absolument non biaisée. **Conclusion sur l'ETP sur sol nu ?**

Il est important de noter également que la formule utilisée n'empêche pas l'ETP de prendre des valeurs négatives. Ces valeurs ne dépassent pas - 0.11 mm.h-1 à Djougou et -0.06 mm.h-1 ailleurs.

A titre illustratif, lorsqu'on regarde la figure 14 qui caractérise l'ETP horaire en fonction du temps, on constate pour cette période de beau temps, les valeurs d'ETP horaire obtenues à Djougou sont très élevées au milieu de la journée par rapport à celles obtenues sur les autres sites. La nuit, c'est Nalohou qui prend le dessus sur les autres sites et Djougou le minimum.

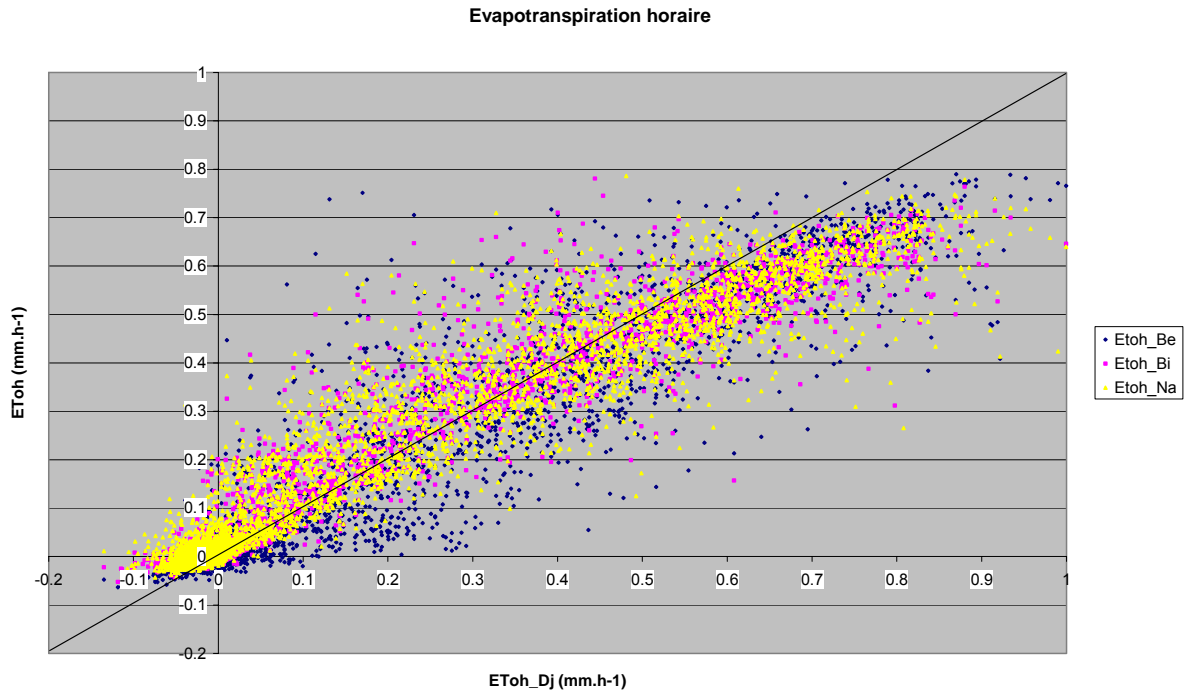


Figure 13 : corrélation de l'ETP horaire sur les 4 sites.

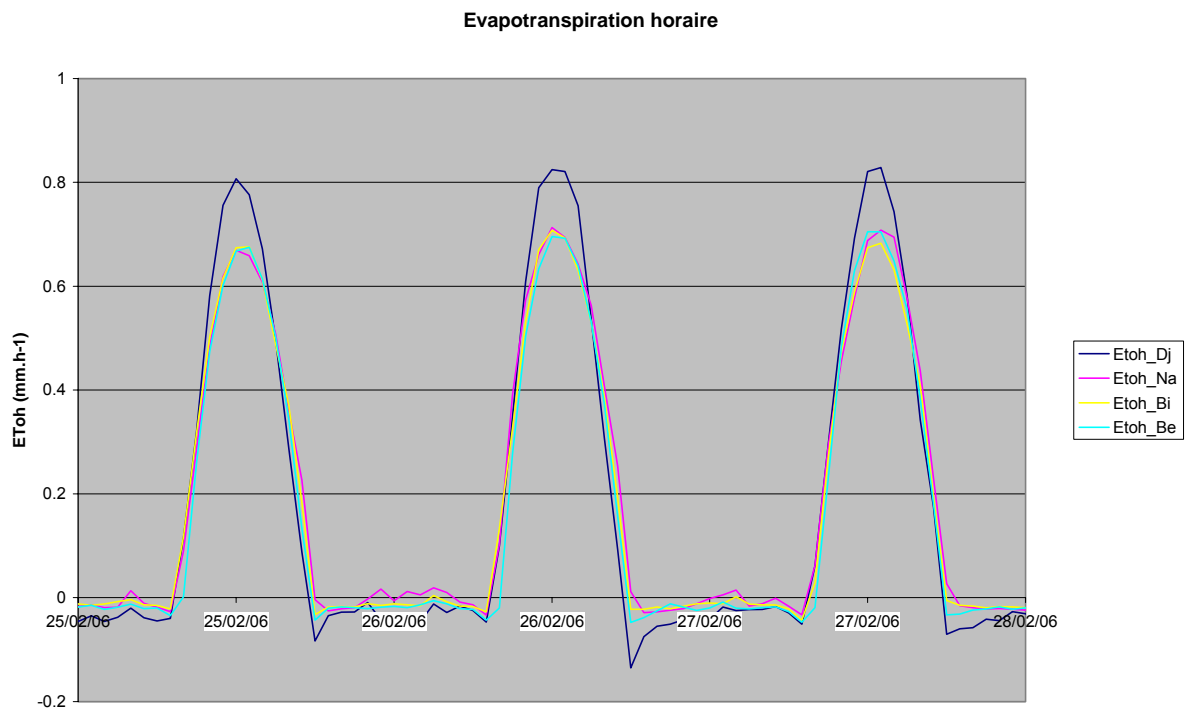


Figure 14 : évolution temporelle de l'ETP horaire sur les 4 sites.

b. ETP journalière.

La corrélation entre les ETP journalières, calculées par les deux méthodes pour les quatre sites (Djougou, Nalohou, Bira et Béléfoungou) est presque parfaite. Le coefficient de détermination entre les différents sites varie de $r^2 = 92\%$ à 98% avec une droite de régression très proche de la bissectrice. Ce qui permet d'affirmer que les deux méthodes de calcul de l'ETP journalière concordent parfaitement et sans biais (figure 15).

Les ETP journalières varient entre 0 et 6 mm/jour. L'observation de la figure 16 a et b, montre qu'en saison sèche, la formule journalière sous estime très légèrement l'ETP (-0.3 mm/jour) et inversement en saison des pluies. La variabilité inter journalière est plus forte en saison des pluies liée à son ennuagement irrégulier, mais la variabilité intersite n'augmente pas, au contraire.

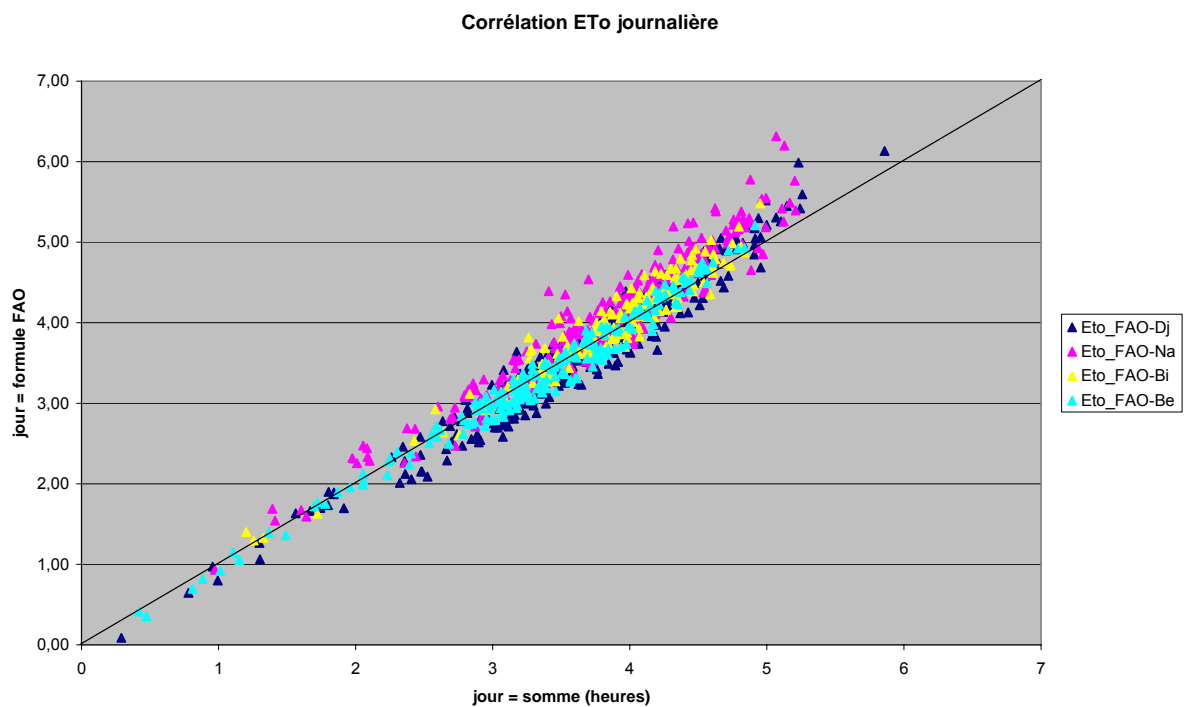


Figure 15 : corrélation de l'ETP journalière sur les 4 sites.

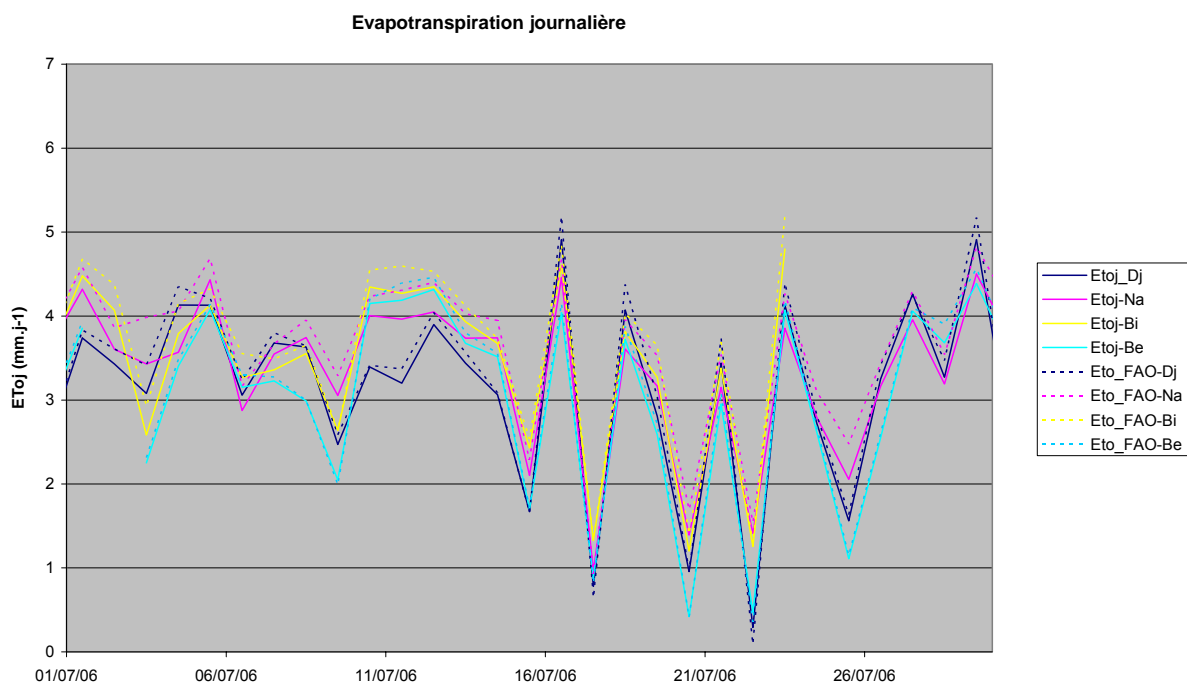
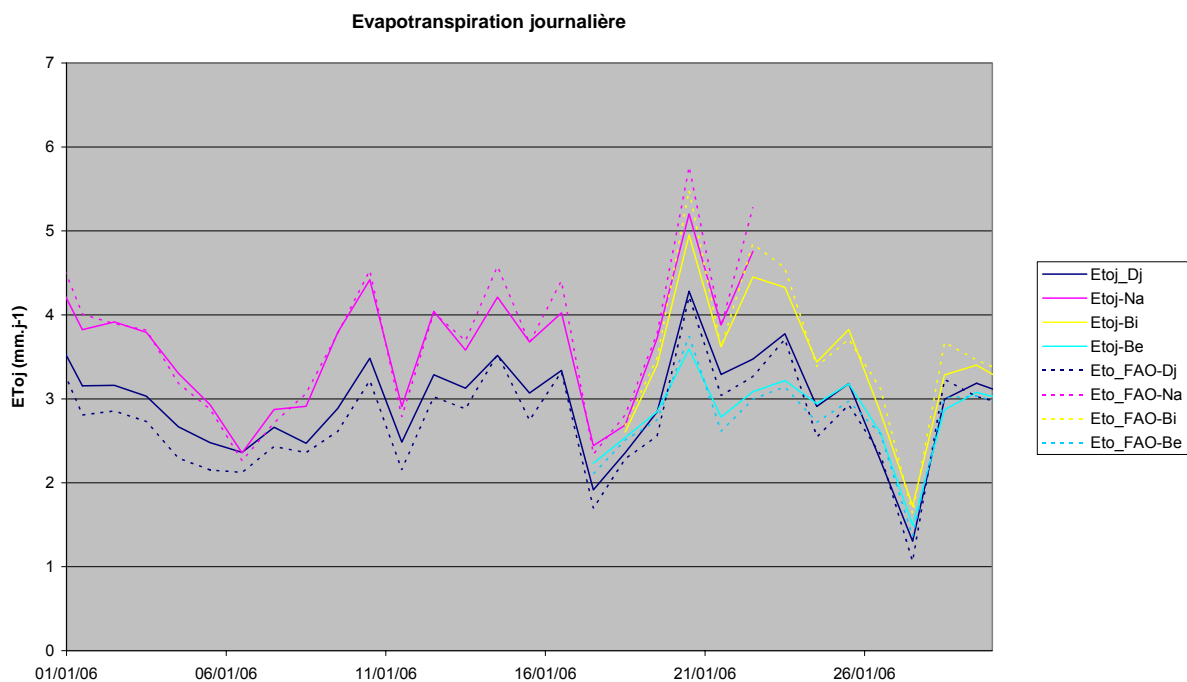


Figure 16 : évolution temporelle de l'ETP journalière sur les 4 sites
(a) en saison sèche au mois de janvier et (b) en saison des pluies au mois de juillet

VIII - Variabilité annuelle et horaire de l'ETP sur la Donga.

D'après la figure 17 du 12/12/05 au 15/08/06, le maximum et le minimum de l'ETP horaire dans la plus part des cas sont observés à Djougou qui est un sol nu tandis que sur les autres sites, il y a la végétation. Les quelques vides observés sur le graphe au niveau des ETP de Bira et de Béléfoungou sont dus à l'arrêt de l'acquisition.

Sur les sites de la campagne, la variabilité est presque identique et les ETP sont rangées dans la même gamme (-0,06 à 0,78 mm.h⁻¹) tandis que Djougou est entre -0,13 et 1 mm.h⁻¹.

Quand aux ETP journalières d'après la figure 18, du 12/11/05 au 10/12/05, la variabilité est presque identique pour les quatre sites. Du 10/12/05 au 18/01/06 on note la rupture de mesure à Bira et Béléfoungou et les ETP journalières de Nalohou sont nettement supérieures à celles de Djougou. Même variabilité du 18/01/06 au 21/03/06 sur les sites avec les maxima à Nalohou et les minima à Béléfoungou. Du 24/03/06 au 31/03/06, les maxima sont observés à Djougou. Durant tout le reste de la période (jusqu'au 15/08/06) les maxima sont à Nalohou, des fois à Djougou mais on observe toujours les minima à Béléfoungou qui est une forêt, les valeurs des ETP journalières sont atténuées par le couvert végétal sur ce site.

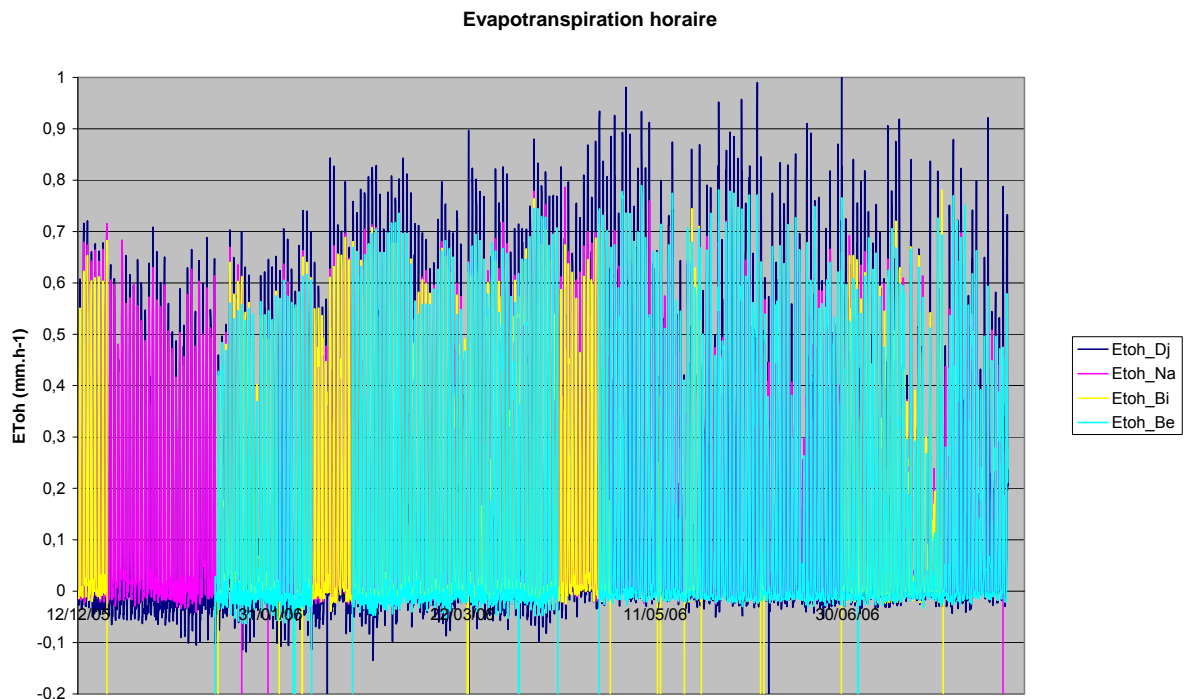


Figure 17 : évolution temporelle de l'ETP horaire tout au long de l'année sur les 4 sites.

Evapotranspiration journalière

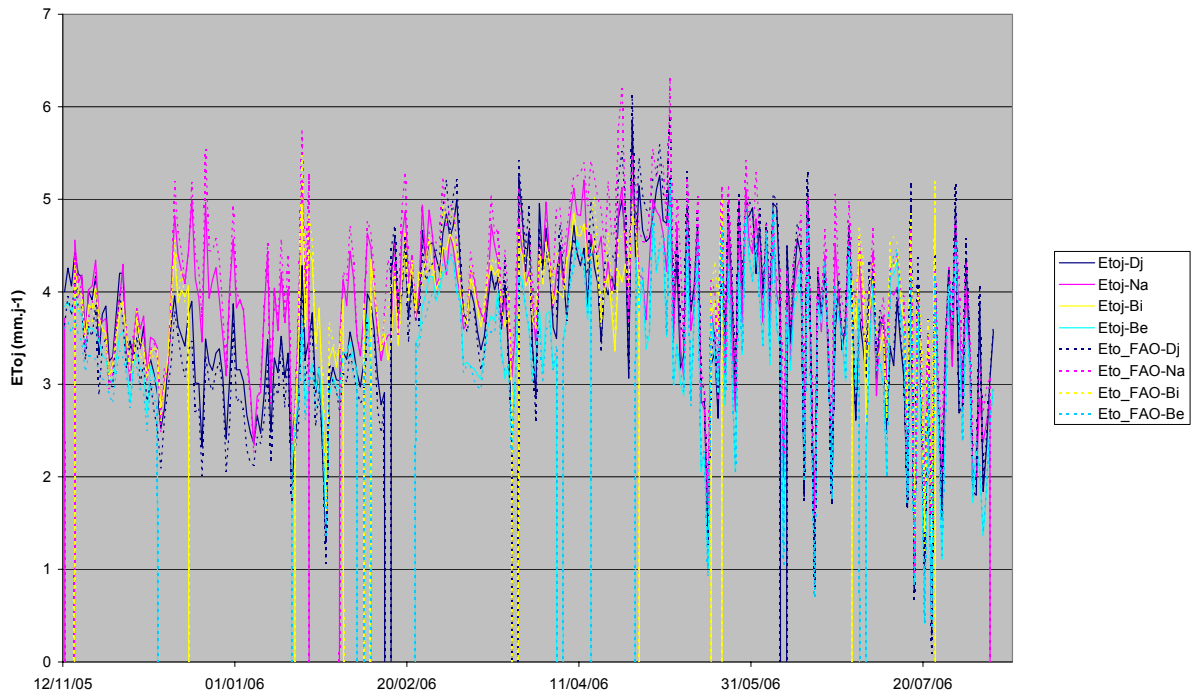


Figure 17 : évolution temporelle de l'ETP journalière tout au long de l'année sur les 4 sites.

CONCLUSION

Dans le cadre du projet AMMA, des appareils ont été installés sur quatre sites du haut bassin de l'Ouémé, il s'agit de Djougou, de Nalohou, de Bira et de Béléfoungou. Sur ces différents sites on peut noter des appareils possédant des capteurs ou des sondes pour enregistrer toutes les quinze minutes (Djougou) ou toutes les trente minutes (Nalohou, Bira et Béléfoungou) les paramètres météorologiques tels que : la température, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique, les radiations (entrant ou sortant), le rayonnement net...

Après une analyse des données enregistrées sur les sites, il en ressort que ces différents appareils fonctionnent normalement à part quelques trous qu'on observe dans les données de Bira, de Nalohou et de Béléfoungou.

Nous avons utilisés les formules de Penman – Monteith recommandées par la FAO en se basant sur les paramètres climatiques cités ci – dessus pour calculer l'évapotranspiration potentielle horaire ou journalière sur ces quatre sites.

Les sites de campagnes ont une variabilité d'ETP horaire située entre -0,06 à 0,78 mm/h et celle de Djougou qui est un sol nu est comprise entre -0,13 à 1mm/h.

Les résultats obtenus sont concluants car il y avait une très bonne corrélation entre les valeurs horaires d'une part et celles journalières d'autre part obtenues sur les sites.

Pour éviter les ruptures dans les données du haut bassin de l'Ouémé, il faut garder les quatre sites ; ainsi on aura toujours de site de référence comme Djougou.

Bibliographie

Allen R.G., L. Pereira, Raes D. and Smith M., 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop waters requirements – FAO irrigation and drainage paper 56; chapters 1, 2, 3 & 4, annex 3& 5.(www.fao.org/docrep/x0490E/x0490e00.htm)

Brochet P., N. Gerbier, 1974. L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie n°65 de la Météorologie Nationale ; 95p..

Campbell Scientific, notice technique des instruments.(www.campbellsci.co.uk)

Margat J., 1997.Evapotranspiration; C.N.F.S.H.(www.cig.ensmp.fr)

Riou C., 1975. La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Mémoire ORSTOM n°80 ; 236p.

Site Internet : www.ird.fr