

EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET RESISTANCE DU COUVERT D'UNE SAVANE A *LOUDETIA ARUNDINACEA* (BASSIN DU KOUILOU, CONGO-BRAZZAVILLE)

Jerzy J. NIZINSKI¹, Gérard GALAT¹, Anh GALAT-LUONG¹, Michaël DINGKUHN² et Denis FABRE²

¹ Institut de Recherche pour le Développement

UR 060 « Clifa »
B.P. 64501
911 Avenue Agropolis
34394 Montpellier cedex 5
georges.nizinski@ird.fr

² Laboratoire « Ecotrop »

CIRAD - TA059/01
Avenue Agropolis
34398 Montpellier cedex 5

Résumé

L'objectif de ce travail est d'estimer l'évapotranspiration réelle et la résistance du couvert d'une savane en utilisant la méthode du rapport de Bowen pour deux périodes contrastées, saison sèche et saison des pluies. La méthode du rapport de Bowen permet de quantifier l'évapotranspiration réelle de la savane à partir des mesures des gradients de température et d'humidité de l'air, du rayonnement net et du flux de chaleur dans le sol. Ses avantages sont une rapidité de mise en place du dispositif de mesure, une résolution temporelle des mesures inférieure à une heure, une continuité des mesures, une bonne intégration des hétérogénéités du flux de chaleur latente d'évaporation du couvert. Ce dispositif est adapté aux recherches agro-météorologiques et éco-physiologiques faites en milieu tropical avec des équipes restreintes. La fiabilité de cette méthode a été appréciée par comparaison avec l'équation Monteith et la méthode de l'équation du bilan hydrique. Cette savane est dominée à 90% par *Loudetia arundinacea* (Pointe Noire, Congo). Les résultats présentés sont issus de mesures qui ont duré 24 jours, du 18 septembre au 11 octobre 1998 : (a) du 18 au 29 septembre (« saison sèche »), la rétention en eau du sol a été inférieure à 70% de la réserve à la capacité au champ (de 63 à 70% de R_{CC} ; stress hydrique sévère ; T/ETP de 0,2 à 0,4) ; (b) du 30 septembre au 11 octobre (« saison des pluies »), la rétention en eau du sol a été de 90 à 92% de R_{CC} ; stress hydrique négligeable ; T/ETP de 0,73 à 0,77). La résistance du couvert moyenne journalière issue du rapport de Bowen a été de 317 s m^{-1} , avec 355 s m^{-1} pour la « saison sèche » et de 279 s m^{-1} pour la « saison des pluies ». Les valeurs de l'ETR cumulée de la savane issues du rapport de Bowen, de la méthode du bilan hydrique et de l'équation de Penman-Monteith sont respectivement de 58,6, 57,8 et 56,2 mm, avec une ETR moyenne journalière de 2,4-2,4 et 2,3 mm jour⁻¹, l'ETR moyenne journalière étant de 2,4, 1,5 et 2,2 mm jour⁻¹ en « saison sèche » et de 2,5, 3,4 et 2,5 mm jour⁻¹ en « saison des pluies ».

Mots clés : résistance du couvert, rapport de Bowen, équation Monteith, évapotranspiration, bilan hydrique.

Abstract

Measurement of savannah's actual evapotranspiration and surface resistance in the Kouilou basin, Congo-Brazzaville

The aim of this work is to study the actual evapotranspiration and surface resistance of the savannah using the Bowen-ratio method for two contrasted periods, dry and rainy season. The Bowen-ratio method was used for the assessment of the actual evapotranspiration from the temperature and specific humidity differences, net radiation and the soil heat flux measurement: its advantages are a rapidity of installation, a temporal resolution of measurement inferior to an hour and a good integration of the heterogeneousness of the savannah's latent flux of vaporization. This method is adapted to the eco-physiological studies in the tropical conditions with reduced teams. The reliability of this method has been assessed by comparison with the Monteith equation and the soil-water balance method in a 90% *Loudetia arundinacea* dominated savannah (Pointe Noire, Congo). Our results relate to the period from 18 September to 11 October 1998 (24 days): (a) from 18 to 29 September (« dry season »), the soil-water content was inferior than 70% of the soil-water content at field capacity (63-70% of

R_{FC} ; large soil-water stress; T/E_p from 0.2 to 0.4); (b) from 30 September to 11 October (« rainy season ») soil-water content close to 90-92% of R_{FC} ; no soil-water stress; T/E_p from 0.73 to 0.77). The mean daily surface resistance issued from the Bowen-ratio method was 317 s m^{-1} , 355 s m^{-1} during the « dry season » and 279 s m^{-1} during the « rainy season ». The total actual evapotranspiration (E_a) issued from the Bowen-ratio method, Penman-Monteith equation and soil-water balance method were, respectively of 58.6–57.8 and 56.2 mm, with the mean daily E_a of 2.4-2.4 and 2.3 mm day^{-1} (2.4-1.5 and 2.2 mm day^{-1} in « dry season » and of 2.5-3.4 and 2.5 mm day^{-1} in « rainy season »).

Key words: surface resistance, Bowen-ratio, Monteith equation, evapotranspiration, soil-water balance.

Introduction

Les études sur l'économie de l'eau dans le bassin du Kouilou, sur la façade atlantique du Congo, ont débuté en 1996 au Laboratoire d'Ecologie Végétale de Pointe Noire (Institut de Recherche pour le Développement – IRD) dans le cadre de la durabilité de plantations d'Eucalyptus (Nizinski *et al.*, 2001), en collaboration avec les équipes de l'Unité de Recherche sur la Productivité des Plantations Industrielles du CIRAD et de l'INRA de Nancy (Bouillet *et al.*, 1999). Ces recherches portaient sur le bilan hydrique de deux écosystèmes, la savane – l'écosystème naturel de cette région, et des plantations d'Eucalyptus (Nizinski *et al.*, 2008) – écosystème artificiel qui tend à remplacer la savane.

L'objectif de ce travail est d'estimer l'évapotranspiration réelle et la résistance du couvert de la savane en utilisant la méthode du rapport de Bowen (Bowen, 1926) à l'aide d'un dispositif mobile, pour deux périodes contrastées, la saison des pluies et la saison sèche. La méthode du rapport de Bowen permet de quantifier l'évapotranspiration réelle des couverts végétaux et leurs résistances à partir des mesures des gradients de température et d'humidité de l'air, du rayonnement net et du flux de chaleur dans le sol. La fiabilité de cette méthode a été appréciée par comparaison avec la méthode de l'équation Penman-Monteith (Monteith, 1965) et la méthode du bilan hydrique.

Cette méthode a essentiellement été utilisée dans les zones climatiques tempérées ; les travaux dans les zones tropicales sont récents et peu nombreux (Amarakoon *et al.*, 2000). L'emploi d'un dispositif mobile permet de travailler sur de grandes surfaces, avec des équipes restreintes. Cette étude donne une première estimation des échanges d'énergie, de masse et de quantité de mouvement de cette savane qui pourront ensuite être comparés aux échanges caractéristiques des plantations.

1. Matériel et méthodes

1.1. Station d'étude

La zone d'étude, la région du Kouilou, est située entre le Cabinda au sud (Angola) et le Gabon au nord (surface de $13\,315 \text{ km}^2$). Cette région est soumise à un climat tropical humide de type équatorial de transition (climat bas-congolais, la façade maritime du Congo constitue la partie septentrionale de la zone plus sèche qui borde le sud-ouest du continent africain) avec des précipitations moyennes annuelles de $P_{1949-98} = 1188 \text{ mm an}^{-1}$, une évapotranspiration potentielle (Penman, 1948) de 1390 mm an^{-1} ($ETP_{92-98} = 3,8 \text{ mm jour}^{-1}$, $ETP_{\text{SAISON PLUIES}} = 4,2 \text{ mm jour}^{-1}$, $ETP_{\text{SAISON SECHE}} = 3,2 \text{ mm jour}^{-1}$), une température moyenne de l'air de $24,9^\circ\text{C}$ et une humidité relative de l'air de 81,1% (moyennes issues de mesures de 1949 à 1998 à la station de référence de Pointe Noire). Nous reprenons la classification de Vennetier (1968) qui décompose l'année en fonction de la pluviométrie : la saison des pluies s'étale sur environ 150 jours de novembre à avril, la saison sèche va de juin à septembre ; les mois de mai et octobre sont considérés comme mois de transition. Les mesures ont été faites du 18 septembre

au 11 octobre 1998. Les précipitations incidentes annuelles et l'évapotranspiration potentielle annuelle ont été respectivement, pour 1998, de 1274 et 1390 mm an⁻¹ (valeurs moyennes calculées pour chaque jour et cumulées sur l'année) ; ces valeurs sont très proches des moyennes annuelles de Pi et de ETP. Les valeurs saisonnières, saison des pluies et saison sèche, de Pi et ETP ont été comparées aux valeurs moyennes calculées sur 49 ans pour Pi ($Pi_{49-98} = 1034$ mm) et sur sept ans pour ETP ($ETP_{92-98} = 1390$ mm an⁻¹) : la saison des pluies 1998-1999 est excédentaire avec $Pi_{98-99} = 1140$ mm, soit 110,2% de Pi_{49-98} . L'ETP est proche de la moyenne 1992-1998, soit 1390 mm an⁻¹ pour 1998 (99,9% de ETP_{92-98}).

La zone d'étude est située à 40 km de Pointe Noire à proximité du lieu-dit Kondi (latitude 4°34' S, longitude 11°54' E, altitude de 125 m) dans un bassin sédimentaire côtier tertiaire (pliocène), de la série des cirques, avec grès argileux, sables et argiles. La station d'étude (photo 1), d'une surface de 892 m² (29,7 x 30 m) est située sur les 38 ha (1500 x 2500 m) d'un peuplement qui est l'un des lambeaux de la savane d'origine.

Photo 1 : Vue de la station d'étude, une savane à *Loudetia arundinacea*. Site of the study station - savannah with *Loudetia arundinacea*.



Le sol de la station d'étude est un sol ferralitique fortement désaturé à texture sablo argileuse ; la zone racinaire a une profondeur de 3 m, la capacité au champ est $R_{CC} = 363$ mm, le point de flétrissement permanent $R_{PPF} = 182$ mm et la réserve utile $R_{RU} = 181$ mm. Cette savane est dominée à 90% par *Loudetia arundinacea* (présence de *Bulbostylis laniceps*, *Cassia mimosoides*, *Ctenium newtonii*, *Cyperus amabilis*, *Cyperus tenax*, *Cyanotis lanata*, *Elionurus argenteus*, *Eriosema glomeratum*, *Eriosema erici-rosenii*, *Loudetia simplex*, *Rhynchelytrum nerviglume*, *Scleria boivinii*) avec, au pic de biomasse en février, une biomasse maximale de 3,5 t ha⁻¹ et une masse morte maximale de 4,6 t ha⁻¹. Au minimum de biomasse, en septembre, la valeur atteint 0,9 t ha⁻¹ et une masse morte minimale de 1,9 t ha⁻¹ ; l'indice foliaire maximal est de 4,1 (février), la valeur minimale étant de 1,3 (septembre) ; l'albédo (a) de la savane, issu de mesures, est de 0,23 (moyenne pour les deux saisons).

1.2. Méthode d'estimation de l'évapotranspiration réelle à partir du rapport de Bowen

L'évapotranspiration réelle moyenne d'un couvert, estimée pour des périodes de 20 minutes, peut se calculer à partir des mesures du rayonnement net (R_n), des mesures du flux de chaleur dans le sol (G_s), et du rapport de Bowen (Bowen, 1926), grandeur calculée. Le rapport de Bowen (β) rend compte de la répartition de l'énergie disponible au niveau d'une surface ; c'est le rapport entre chaleur sensible (H) et chaleur latente d'évaporation (λE) :

$$\beta = H / \lambda E \quad [1]$$

Ce rapport de Bowen est utilisé avec l'équation du bilan d'énergie de la surface, ici simplifiée :

$$R_n = H + \lambda E + G_s \quad [2]$$

avec R_n , le rayonnement net en $W m^{-2}$; H , le flux de chaleur sensible en $W m^{-2}$; λE , le flux de chaleur latente d'évaporation en $W m^{-2}$; G_s , le flux de chaleur dans le sol en $W m^{-2}$. On aboutit donc à :

$$\lambda E = (R_n - G_s) / (1 + \beta) \quad [3]$$

Pour les surfaces présentant une très petite pente (ici $< 1\%$), uniformes et suffisamment étendues (un rapport hauteur de peuplement/étendue horizontale de 1:100), les flux de chaleur sensible et de chaleur latente sont considérés comme verticaux et nous appliquons le principe de « similarité » entre les coefficients de transfert de chaleur sensible (k_H) et de chaleur latente (k_V), ainsi $k_H \approx k_V$ (Philip, 1987). Ici, la hauteur du peuplement est de 1,5 m et sa surface de 38 ha. Avec des périodes de mesure de 20 minutes, les relations empiriques entre flux et gradients verticaux des chaleurs sensible et latente peuvent s'écrire :

$$H = -\rho_a c_p k_H (\partial T / \partial z) \quad \text{et} \quad \lambda E = -((\rho_a c_p) / \gamma) k_V (\partial e / \partial z) \quad [4] \text{ et } [5]$$

avec ρ_a , la densité de l'air en $kg m^{-3}$; c_p , la chaleur massique de l'air en $J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$; k_H , le coefficient de transfert turbulent de chaleur sensible en $m^2 s^{-1}$; T , la température de l'air en $^\circ C$; z , l'altitude en m; $(\partial T / \partial z)$, le gradient des températures en $^\circ C m^{-1}$; k_V , le coefficient de transfert turbulent de masse en $m^2 s^{-1}$; e , la pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air en kPa; $(\partial e / \partial z)$, le gradient des pressions actuelles de vapeur d'eau dans l'air en $kPa m^{-1}$; γ , la constante psychrométrique en $kPa ^\circ C^{-1}$. La constante psychrométrique s'écrit :

$$\gamma = (c_p p) / \lambda (M_{EAU} / M_{AIR}) \quad [6]$$

avec c_p , la chaleur massique de l'air en $J kg^{-1}$ ($1,012 J kg^{-1}$); p , la pression atmosphérique en kPa; λ , la chaleur latente de vaporisation en $J g^{-1}$ ($2451,8 J g^{-1}$); M_{EAU} , la masse molaire de l'eau en $kg mole^{-1}$ ($18,10^{-3} kg mole^{-1}$); M_{AIR} , la masse molaire de l'air en $kg mole^{-1}$ ($29,10^{-3} kg mole^{-1}$).

Le rapport de Bowen peut alors s'écrire :

$$\beta = \gamma (\partial T / \partial z) / (\partial e / \partial z) = \gamma (dT / (de)) \quad [7] \text{ et } [8]$$

ou encore s'écrire sous la forme :

$$\beta = \gamma (T_2 - T_1) / (e_{2(T_2)} - e_{1(T_1)}) \quad [9]$$

avec T_1 , la température de l'air à 2 m au-dessus de la surface du sol de la savane; T_2 , la température de l'air à 5 m au-dessus de la surface du sol de la savane; $e_{1(T_1)}$, la pression actuelle de vapeur d'eau à la température de l'air T_1 ($z = 2$ m au-dessus de la surface du sol de la savane); $e_{2(T_2)}$, la pression actuelle de vapeur d'eau à la température de l'air T_2 ($z = 5$ m au-dessus de la surface du sol de la savane).

Sachant que G_s peut s'écrire :

$$G_s = c_s h_{sol} [(\theta_s(t + dt) - \theta_{s(t)}) / dt] \quad [10]$$

avec c_s , la capacité thermique du sol en $J m^{-3} ^\circ K^{-1}$ ($1,96 10^6 J m^{-3} K^{-1}$); dt , le de temps des calculs en s (1200 secondes); $\theta_s(t + dt)$, la température moyenne du sol à 0,05 m de profondeur lors des 19^e et 20^e minutes du pas de temps de mesure en $^\circ C$; $\theta_{s(t)}$, la température moyenne à 0,05 m de profondeur lors des 1^e et 2^e minutes du pas de temps de mesure en $^\circ C$;

h_{sol} , l'épaisseur de la couche de sol prise en compte, ici 0,1 m (capteurs à 0,05 m et à 0,15 m de profondeur).

Les valeurs de λE calculées en $J m^{-2} s^{-1}$ sur des périodes de 20 minutes (1200 s), sont sommées sur la journée pour obtenir l'évapotranspiration réelle journalière (en $mm jour^{-1}$) :

$$ETR_{BOWEN} = \lambda E_j = \sum \lambda E_{(t)} dt \quad [11]$$

$$ETR_{PENMAN-MONTEITH} = ETP / (1 + ((\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_c r_a))) \quad [12]$$

(Monteith, 1965)

avec λE_j , l'évapotranspiration réelle journalière en $mm jour^{-1}$; $\lambda E_{(t)}$, l'évapotranspiration réelle, pour $dt = 1200$ s, en $J m^{-2} s^{-1}$; r_c , la résistance du couvert en $s m^{-1}$.

1.3. Méthode d'estimation de la résistance du couvert

1.3.1. A partir du rapport de Bowen (Paw et Meyers, 1989)

La formule se calcule ainsi :

$$r_c/r_a = [(((\Delta/\gamma) \beta) - 1) + (1 + \beta)] [\rho_a c_p ((e_{s(T)} - e_{a(T)})/\gamma (R_n - G_s))] \quad [13]$$

avec r_c , la résistance du couvert en $s m^{-1}$; r_a , la résistance aérodynamique, en $s m^{-1}$, $r_a = (1/(k^2 u_2)) (\ln(z - d)/z_0)^2$ (Monteith, 1965); k , la constante de von Karman (0,39); u_2 , la vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol en $m s^{-1}$; z , le niveau considéré en m; z_0 , la hauteur de rugosité de la surface en m; d , la hauteur du déplacement du plan où la vitesse du vent s'annule, en m; $d = 0,63 h$ et $z_0 = 0,1 h$ (Thom, 1972); avec d , la hauteur de déplacement en m; z_0 , la longueur de rugosité en m; h , la hauteur du peuplement en m; Δ , la dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en $kPa ^\circ C^{-1}$; $e_{s(T)} - e_{a(T)}$, le déficit de saturation de l'air en kPa ; $e_{s(T)}$, la pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface T en kPa .

1.3.2. Issue du modèle de Jarvis-Stewart (Stewart, 1988)

La formule est établie à partir des relations empiriques entre la résistance stomatique d'une feuille de *Loudetia arundinacea* (r_s) (mesurée à l'aide d'un poromètre AP4, Delta-T-Devices®), l'indice foliaire (LAI), le rayonnement global (R_g), le potentiel hydrique des feuilles ($\Psi_{feuille}$; chambre à pression mise au point par la Société PMS Instrument®; Corvallis, Oregon, USA; cette chambre est portable et alimentée par une bouteille d'azote; précision des mesures $\pm 0,5$ bars), le déficit de saturation de l'air ($e_{s(T)} - e_{a(T)}$) et la réserve en eau du sol (R ; sonde à neutrons « Solo25 », Centre d'Etudes Nucléaires, Cadarache, France) – relations obtenues par Founa-Toutou (2000) :

$$r_c = r_{smin}/LAI (f(R_g)) (g(\Psi_{feuille})) (h(e_{s(T)} - e_{a(T)})) (i(R_{CC} - R)) \quad [14]$$

avec r_{smin} , la résistance stomatique minimale d'une feuille (valeurs mesurées) en $s m^{-1}$.

1.4. Dispositif expérimental et acquisition des données

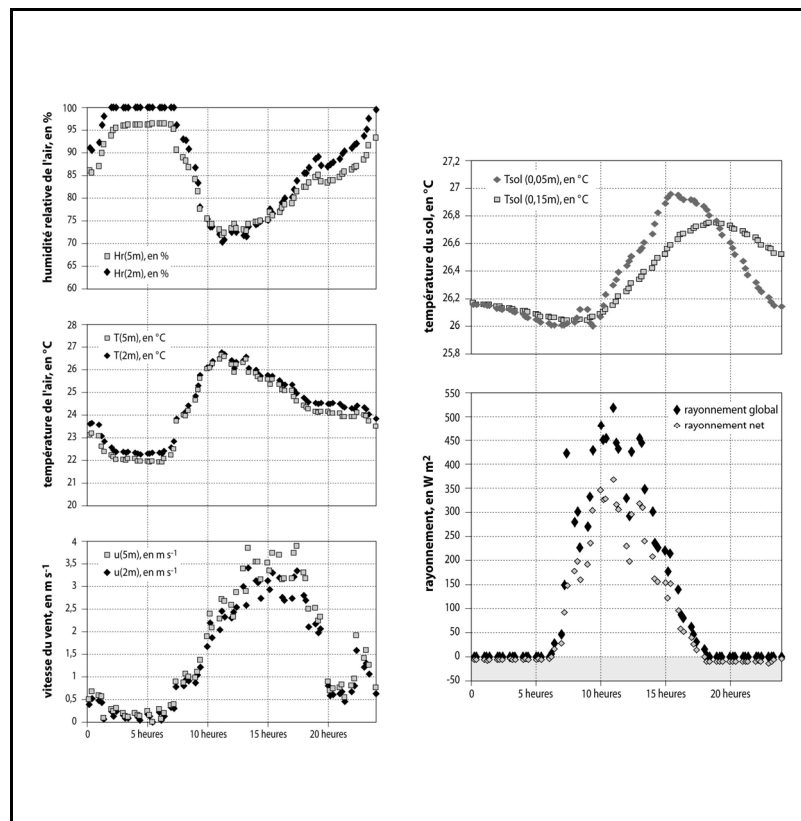
Les mesures ont été faites à l'échelle du peuplement avec un pas de temps de vingt minutes. Les résultats présentés sont issus de mesures qui ont duré 24 jours :

- a) **du 18 au 29 septembre 1998** – i.e. la période « saison sèche » (12 jours) avec une rétention en eau du sol inférieure à 70% de la réserve à la capacité au champ (de 63 à 70% de R_{CC} ; stress hydrique sévère; rapport transpiration/évapotranspiration potentielle, T/ETP , de 0,24 à 0,37);

b) du 30 septembre au 11 octobre 1998 – i.e. la période « saison des pluies » (12 jours) avec une rétention en eau du sol de 89,9 à 92% de R_{CC} (stress hydrique négligeable ; T/ETP de 0,72 à 0,76).

Les calculs de l'ETR ont été faits à partir des valeurs diurnes des gradients des températures de l'air et du sol (dT), des pressions actuelles de vapeur d'eau à la température de l'air T (d_e) et du rayonnement net (durée astronomique du jour) de 6h00 à 18h00, soit une durée d'environ 12 heures, durée variant avec la date. Pour le lieu-dit Kondi, le premier jour de mesure (le 261^{ème} jour de l'année, le 18 septembre), la durée du jour est de 11,99 heures et le dernier jour de mesure (le 285^{ème} jour de l'année, le 11 octobre), la durée du jour est de 12,09 heures. Nous avons mesuré avec un pas de temps de vingt minutes la température moyenne de l'air, l'humidité relative de l'air (sonde HMP35AC, Vaisala®, Helsinki, Finlande), la vitesse du vent (anémomètre A100R, Vector Instruments®, Rhyl, Royaume Uni), et ce, à deux niveaux, à 2 m et à 5 m au-dessus de la surface du sol de la savane. Le rayonnement global (pyranomètre Li-200SZ, Li-cor®, NE, Etats Unis) et le rayonnement net (bilanmètre REBS/Q-7, Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) ont été mesurés à 6 m au-dessus de la surface du sol. La température moyenne du sol a été mesurée à 0,05 m et 0,15 m dans le sol (sondes 107, Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis). Les sondes HMP35AC et les anémomètres ont été installés sur un mât de type « Super-Vidéo® » amovible et haubané (hauteur maximale de 36 mètres). Les capteurs ont été montés sur un mât de 6 m de hauteur. Afin de minimiser l'influence des supports sur les mesures, les capteurs sont tenus par des bras métalliques longs de 1 à 2 m (selon la sensibilité du capteur concerné), ces derniers étant fixés et isolés des supports. Les mesures sont effectuées avec un pas de temps de vingt minutes et cumulées sur la journée pour donner les valeurs du rayonnement net, des températures de l'air, de l'humidité relative de l'air et de la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (ici exemple du 29 septembre 1998 ; figure 1).

Figure 1 : Evolution au cours de la journée du 29 septembre 1998 (à gauche) de la température moyenne de l'air (T_{air}), de l'humidité relative de l'air (H_r), de la vitesse du vent (u) à 2,0 et 5,0 m au-dessus de la surface du sol de la savane ; (à droite) de la température du sol à 0,05 et 0,15 m de profondeur, du rayonnement global (R_g) et rayonnement net (R_n) à 6,0 m au dessus de la surface du sol de la savane. Evolution during the day of September 29, 1998 (a) of the mean air temperature (T_{air}), relative humidity (H_r), wind speed (u) 2.0 and 5.0 m above the soil surface of the savannah; (b) mean soil temperature at a depth of 0.05 m and 0.15 m; of global (R_g) and net radiation (R_n) at 6.0 m above the soil surface of the savannah.



La précision des mesures de température a été inférieure à $\pm 0,1^\circ\text{C}$, soit pour les deux capteurs $dT = \pm 0,2^\circ\text{C}$, la précision des mesures de la pression partielle de vapeur d'eau a été inférieure à $\pm 0,01\text{ kPa}$, soit pour les deux capteurs de $\pm 0,02\text{ kPa}$ (Revfeim et Jordan, 1976). Les mesures en continu ont été stockées sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger 21XL (Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) et ensuite transférées à l'aide d'une interface optique RS232-SC32A et du logiciel PC208E Edlog Version 6.6. (Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) sur l'ordinateur installé dans le laboratoire mobile, un camion tout terrain aménagé en laboratoire (figure 2).

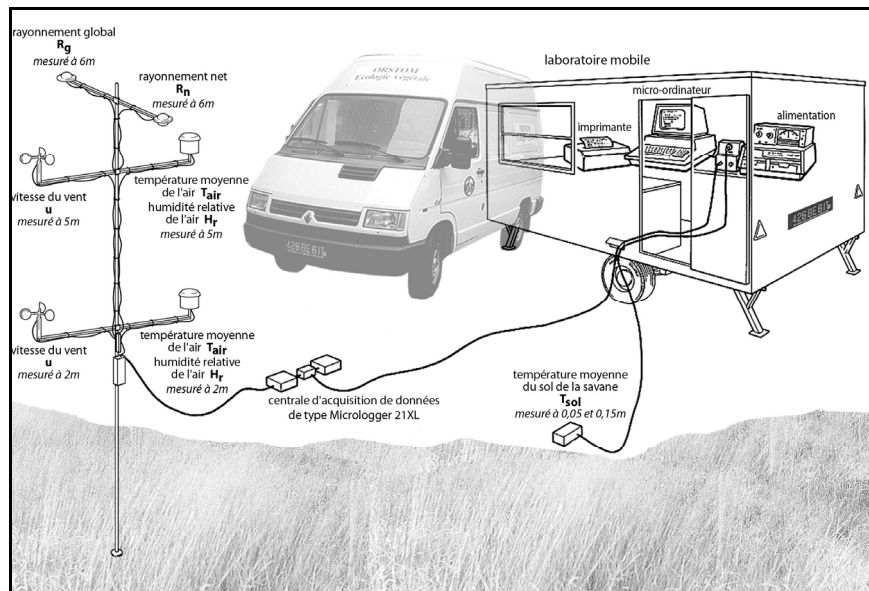


Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental de mesure de l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal. *Diagram of the experimental mobile laboratory of measurement of actual canopy evapotranspiration.*

L'indice foliaire a été estimé chaque 30^{ème} du mois à partir de mesures mensuelles de biomasse de janvier 1997 à juin 1999 avec estimation de la composition spécifique, de la biomasse et de la masse morte (échantillonnage par dix carrés de 1 m, trié, séché et pesé par espèce) et estimation de la masse surfacique d'un échantillon d'une cinquantaine de feuilles vivantes de *Loudetia arundinacea* (espèce dominante ; prélèvements à l'aide d'un emporte pièce). La période des mesures correspond à la fin d'une saison sèche puis à une nouvelle période de croissance des espèces de la savane pendant laquelle la biomasse augmente. Les valeurs journalières de l'indice foliaire ont été calculées à partir d'une relation linéaire entre biomasse et indice foliaire.

2. Résultats et discussion

2.1. Profils des variables microclimatiques au-dessus de la savane

Les résultats proviennent des mesures effectuées du 18 au 29 septembre (« saison sèche ») et du 30 septembre au 11 octobre 1998 (« saison des pluies ») du sommet du couvert jusqu'au niveau $z_1 = 2\text{ m}$ et $z_2 = 5\text{ m}$ qui se situent dans la « couche limite de surface » au-dessus du couvert dense et homogène d'une hauteur de 1,5 m et d'une surface de 38 000 m². La « couche limite de surface » d'une telle savane subtropicale est $Z_H \approx 3$ multiplié par la hauteur du peuplement dans le cas du flux de chaleur sensible ($Z_{\lambda E} \approx 3,5$ multiplié par la hauteur du peuplement dans le cas du flux de chaleur latente) ; il n'y a pas d'effet de « fetch » (Heilman et Brittin, 1989), c'est-à-dire que les formules aérodynamiques classiques peuvent y être utilisées pour déterminer les flux de chaleur sensible et de chaleur latente d'évaporation. Nous

avons exclu les valeurs du rapport de Bowen $\beta \approx -1$, valeurs comprises entre -1,3 et -0,7 (Ohmura, 1982) : il s'agit ici pour l'essentiel de mesures nocturnes pour lesquelles il y a inversion des gradients de température et de pression partielle de vapeur d'eau, pour $R_n - G_s < 0$, de < 0 et $dT < 0$. Cette inversion des gradients de T et e s'est également produite au cours des journées du 18, 24 et 30 septembre et 7 octobre (précipitations incidentes respectivement de 7,9 mm, 3,8 mm, 91,7 mm et 8,7 mm).

Du 18 septembre au 11 octobre 1998, la moyenne de R_n et de G_s moyen journalier est respectivement de 7,4 et de 0,8 M J m⁻² jour⁻¹ (10,9% de R_n), avec pour la « saison sèche » 7,2 et 0,8 M J m⁻² jour⁻¹ (10,5 % de R_n) et, pour la « saison des pluies », 7,7 et 0,8 M J m⁻² jour⁻¹ (11,3% de R_n) (tableau 1). Les maximums journaliers de R_n ont été de 14,2 M J m⁻² jour⁻¹ (26 septembre 1998 – « saison sèche ») et de 12,3 M J m⁻² jour⁻¹ (« saison des pluies »). Les maximums journaliers de G_s ont été de 0,8 M J m⁻² jour⁻¹ (10 octobre 1998 – « saison sèche ») et 0,8 M J m⁻² jour⁻¹ (« saison des pluies »). Les minimums journaliers de R_n ont été respectivement de 3,1 M J m⁻² jour⁻¹ (20 septembre 1998 – « saison sèche ») et de 4,1 M J m⁻² jour⁻¹ (« saison des pluies »). Les minimums journaliers de G_s ont été respectivement de 0,8 M J m⁻² jour⁻¹ (27 septembre 1998) (« saison sèche ») et 0,8 M J m⁻² jour⁻¹ (« saison des pluies »).

date	jour Julien	ETP de Penman (48) mm jour ⁻¹	rayonne- ment net R_n mesuré à 6m MJ m ⁻² jour ⁻¹	indice foliaire LAI mesuré m ² m ⁻²	vitesse du vent u mesuré à 2m m s ⁻¹	résistance aérodyna- mique r_a s m ⁻¹	résistance du couvert r_c modèle Jarvis- Stewart s m ⁻¹	résistance du couvert r_c du rapport Bowen s m ⁻¹	réten- tion en eau du sol R/R _c mesuré %	transpi- ration relative T/ETP	précipi- tations incidentes Pi mesuré mm	précipi- tations au sol Ps mesuré mm	inter- ception net In mesuré mm	ETR de l'équation du bilan mm jour ⁻¹	ETR de Penman Monteith (65) mm jour ⁻¹	ETR du rapport de Bowen mm jour ⁻¹
18 sept	261	3,81	9,64	1,65	2,3	241	223	98	63,4	0,24	7,9	5,7	2,2	2,71	2,56	3,13
19 sept	262	3,41	6,80	1,68	1,9	297	328	327	63,4	0,24				0,73	2,16	2,16
20 sept	263	3,14	3,09	1,70	1,8	314	892	839	63,4	0,24				0,93	1,24	1,54
21 sept	264	3,98	6,08	1,72	2,3	236	392	491	63,4	0,24				0,82	2,09	2,01
22 sept	265	3,85	5,82	1,74	1,9	293	393	573	63,4	0,24				0,82	2,22	1,86
23 sept	266	2,11	5,20	1,76	1,7	326	441	443	70,4	0,37	3,8	3,3	0,5	1,42	1,22	1,67
24 sept	267	4,38	10,12	1,78	2,7	207	195	119	70,4	0,37				1,34	2,87	3,32
25 sept	268	1,86	4,47	1,80	1,8	303	492	500	70,4	0,37				1,11	0,97	1,45
26 sept	269	6,04	14,18	1,82	2,5	217	145	117	70,4	0,37				2,10	4,37	4,61
27 sept	270	3,76	7,30	1,84	1,8	300	306	245	70,4	0,37				2,24	2,36	2,55
28 sept	271	3,00	5,56	1,86	2,3	244	385	284	70,4	0,37				1,65	1,56	1,78
29 sept	272	3,89	7,65	1,89	2,1	264	273	229	70,4	0,37				1,47	2,41	2,56
30 sept	273	6,03	12,32	1,91	3,3	167	156	148	92,0	0,76	91,8	86,7	5,1	8,58	3,87	3,95
1 oct	274	4,11	7,89	1,93	2,7	202	239	296	92,0	0,76				3,53	2,77	2,58
2 oct	275	1,70	4,54	1,96	1,8	316	512	482	92,0	0,76				2,11	1,02	1,46
3 oct	276	3,23	7,56	1,99	2,2	254	244	223	92,0	0,76				2,47	2,31	2,36
4 oct	277	4,59	8,29	2,02	2,9	194	232	314	92,0	0,76				3,75	3,04	2,71
5 oct	278	4,39	7,95	2,05	2,2	248	240	359	92,0	0,76				2,89	3,09	2,70
6 oct	279	4,16	8,01	2,08	2,6	210	243	287	92,0	0,76				3,33	2,75	2,59
7 oct	280	4,45	8,50	2,10	2,4	226	224	308	89,9	0,72	8,8	8,0	0,7	4,61	3,09	2,77
8 oct	281	2,39	4,15	2,13	2,0	283	468	502	89,9	0,72				2,56	1,37	1,33
9 oct	282	3,60	8,88	2,16	2,1	265	200	145	89,9	0,72				1,97	2,69	2,89
10 oct	283	2,65	7,56	2,19	1,5	366	220	45	89,9	0,72				2,50	2,08	2,50
11 oct	284	3,04	6,47	2,22	2,2	256	270	239	89,9	0,72				2,18	2,04	2,12
18 au 29 sept		3,60	7,16	1,77	2,09	270	372	355	67,48	0,32	11,64	8,97	2,67	1,45	2,17	2,39
minimale		1,86	3,09	1,65	1,69	207	145	98	63,36	0,24				0,73	0,97	1,45
maximale		6,04	14,18	1,89	2,66	326	892	839	70,42	0,37				2,71	4,37	4,61
29 sept au 11 oct		3,69	7,68	2,06	2,32	249	271	279	91,13	0,74	100,50	94,69	5,81	3,37	2,51	2,50
minimale		1,70	4,15	1,91	1,51	167	156	45	89,85	0,72				1,97	1,02	1,33
maximale		6,03	12,32	2,22	3,30	366	512	502	92,04	0,76				8,58	3,87	3,95
18 sept au 11 oct		3,65	7,42	1,91	2,20	260	321	317	79,30	0,53	112,14	103,66	8,48	2,41	2,34	2,44
minimale		1,70	3,09	1,65	1,51	167	145	45	63,36	0,24				0,73	0,97	1,33
maximale		6,04	14,18	2,22	3,30	366	892	839	92,04	0,76				8,58	4,37	4,61

Tableau 1 : Evapotranspiration réelle et de la résistance du couvert de la savane à *Loudetia arundinacea* ; valeurs obtenues par les méthodes de l'équation du bilan, de l'équation de Penman-Monteith et du rapport de Bowen sur la période allant du 18 septembre au 11 octobre 1998. *Actual evapotranspiration and canopy resistance of savannah with Loudetia arundinacea, values obtained from the soil-water balance equation, Penman-Monteith equation and Bowen-ratio method during the period from September 18 to October 11, 1998.*

La mesure directe du flux de chaleur à la surface du sol est très imprécise ; cette imprécision est due aux différences de conductivité thermique entre les capteurs et le sol et à un écoulement d'eau et de vapeur d'eau sur les capteurs qui nuit à la qualité du contact entre ces capteurs et le sol. Le flux de chaleur dans le sol est en moyenne de 10,9% de la valeur du rayonnement net. Le profil vertical diurne de la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air

indique une diminution de la pression partielle avec l'altitude, la surface de la savane constitue donc la principale source d'évaporation.

- Les pressions partielles de vapeur d'eau de l'air moyennes journalières e_2 et e_5 ont été respectivement de 24,3 et de 24 kPa, avec 24,1 et 23,7 kPa pour la « saison sèche », et 24,4 et 24,1 kPa pour la « saison des pluies ».
- Les températures moyennes journalières de l'air T_2 et T_5 ont été respectivement de 24,3 et de 24°C, avec 24,1 et 23,7°C pour la « saison sèche » et 24,4 et 24,1°C pour la « saison des pluies ».
- Les températures moyennes journalières du sol $T_{0,05}$ et $T_{0,15}$ ont été respectivement de 28,9 et de 28,1°C, avec 28,2 et 28,5°C pour la « saison sèche » et 29,5 et 28,5°C pour la « saison des pluies ».
- Les vitesses du vent moyennes journalières ont été respectivement, à 2 m et 5 m de hauteur au-dessus de la savane (u_2 et u_5), de 1,6 et 1,8 m s⁻¹, avec 1,4 et 1,7 m s⁻¹ pour la « saison sèche », et 1,7 et 1,9 m s⁻¹ pour la « saison des pluies ».

Les valeurs du rayonnement net, de la pression partielle de vapeur d'eau de l'air, des températures de l'air moyennes journalières et de la vitesse du vent ont été comparées à celles issues des données météorologiques journalières de la station météorologique de l'Aéroport de Pointe Noire (R_n pour la station météorologique a été calculé selon la formule de Brunt, 1939) ; $T_{\text{météo}}$, $e_{\text{météo}}$, T , e et u sont mesurés à 2 m du sol, avec $R_n/R_{n\text{météo}} = 0,93$; $T/T_{\text{météo}} = 0,99$; $e/e_{\text{météo}} = 0,98$; $u/u_{\text{météo}} = 0,83$. Si on détaille les deux « saisons », les valeurs de R_n , T , e et u sont, lors de la « saison sèche » de $R_n/R_{n\text{météo}} = 0,89$; $T/T_{\text{météo}} = 0,99$; $e/e_{\text{météo}} = 0,97$; $u/u_{\text{météo}} = 0,86$. Lors de la « saison des pluies », on obtient $R_n/R_{n\text{météo}} = 0,97$; $T/T_{\text{météo}} = 0,99$; $e/e_{\text{météo}} = 0,98$; $u/u_{\text{météo}} = 0,80$. Les rapports $T/T_{\text{météo}}$, $e/e_{\text{météo}}$ et $u/u_{\text{météo}}$ indiquent que, bien que ces deux points de mesures soient éloignés l'un de l'autre de 40 km, leur position par rapport à la côte d'Atlantique (< 5 km) est déterminante, l'état de la surface (savane ou gazon de la station météorologique) l'étant moins. Le rapport $R_n/R_{n\text{météo}}$ s'explique par l'état de la surface (teneur en eau du sol, indice foliaire, recouvrement de la surface du sol) : le rayonnement net de la savane est changeant, celui du gazon de la station météorologique plus constant : lors de la « saison sèche » dans la savane, il subsiste des chaumes jaunies, l'indice foliaire est réduit ($LAI = 1,6$ à $1,9$) et lors de la « saison des pluies », les feuilles sont de plus en plus vertes, l'indice foliaire variant de $1,9$ à $2,2$; le LAI du gazon bien alimenté en eau et ses qualités optiques sont supposés constants. Les valeurs du flux de chaleur latente d'évaporation (λE) et du rayonnement net (R_n), ont été comparées à celles obtenues en 1968-1971 par Riou (1975, Brazzaville) : elles sont proches.

2.2. Evapotranspiration potentielle et réelle de la savane

L'évapotranspiration potentielle moyenne journalière sur 24 jours, issue de l'équation de Penman (1948) est de 3,6 mm jour⁻¹ ; l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière étant de 3,6 mm jour⁻¹ en « saison sèche » et de 3,7 mm jour⁻¹ en « saison des pluies » (tableau 1). Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière ont été comparées à celles calculées suivant la même formule de Penman (1948) à partir des données météorologiques journalières de la station météorologique de l'Aéroport de Pointe Noire : elles sont proches. Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière ont été, respectivement pour la savane (ETP) et la station météorologique (ETP_{météo}), de 3,6 et 3,9 mm jour⁻¹ (ETP/ETP_{météo} = 0,9) ; si on détaille les deux « saisons », les valeurs d'ETP sont, lors de la « saison sèche », de 3,6 et 3,8 mm jour⁻¹ (ETP/ETP_{météo} = 0,9) et, lors de la « saison des pluies », de 3,7 et 4 mm jour⁻¹ (ETP/ETP_{météo} = 0,9). Le rapport ETP/ETP_{météo} dépend de la hauteur du peuplement (la hauteur de la savane est de 1,5 m et celle du gazon de 0,1 m) et

de l'indice foliaire, celui du gazon étant supposé constant, celui de la savane variant de 1,6 à 1,9 (« saison sèche ») ou de 1,9 à 2,2 (« saison des pluies »).

Sur l'ensemble de la période de mesure, du 18 septembre au 11 octobre 1998, l'évapotranspiration réelle moyenne sur 20 minutes et sur la journée a été respectivement de $0,03 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$ et de $2,4 \text{ mm jour}^{-1}$ avec, pour la « saison sèche », $0,03 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$ et $2,4 \text{ mm jour}^{-1}$ et, pour la « saison des pluies », $0,03 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$ et $2,4 \text{ mm jour}^{-1}$. Les maximums journaliers de l'ETR ont été de $0,55 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$ et de $4,6 \text{ mm j}^{-1}$ (26 septembre 1998) (« saison sèche »), et de $0,27 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$ et de $3,9 \text{ mm jour}^{-1}$ (« saison des pluies ») ; les minimums journaliers de l'ETR valent $1,4 \text{ mm jour}^{-1}$ (« saison sèche ») et $1,3 \text{ mm jour}^{-1}$ (« saison des pluies »). Nous avons comparé les valeurs de l'évapotranspiration réelle cumulée de la savane sur 24 jours issues du rapport de Bowen avec celles issues du bilan hydrique (Nizinski *et al.*, 2008) et de l'équation de Penman-Monteith (résistance du couvert issue du modèle de Jarvis-Stewart ; Founa-Toutou, 2000 ; figure 3) obtenues sur la même station d'étude de façon synchrone : les ETR cumulées sur vingt-quatre jours sont respectivement, pour le bilan hydrique, l'équation de Penman-Monteith et le rapport de Bowen, de 57,8, 56,2 et 58,6 mm (figure 4), avec une évapotranspiration moyenne journalière de 2,41, 2,34 et 2,44 mm jour^{-1} (tableau 1).

Figure 3 : Relation entre la résistance du couvert de la savane à *Loudetia arundinacea* issue du modèle de Jarvis-Stewart (Founa-Toutou, 2000) et du rapport de Bowen ; valeurs journalières lors de la période du 18 septembre au 11 octobre 1998. Relationship between the canopy resistance of savannah with *Loudetia arundinacea* obtained from Jarvis-Stewart model (Founa-Toutou, 2000) and from Bowen-ratio method; daily values during the period from September 18 to October 11, 1998.

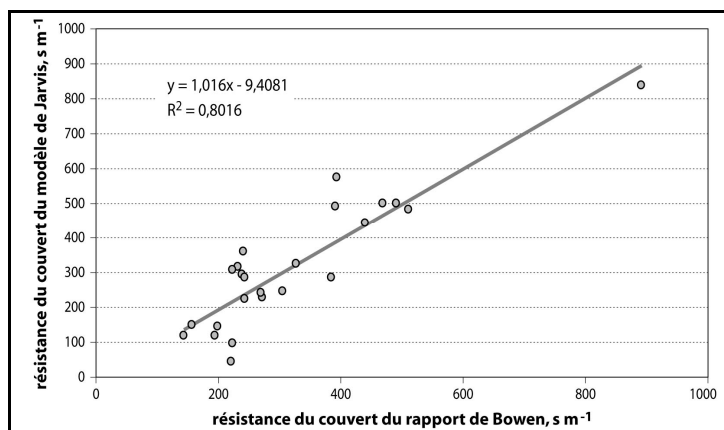
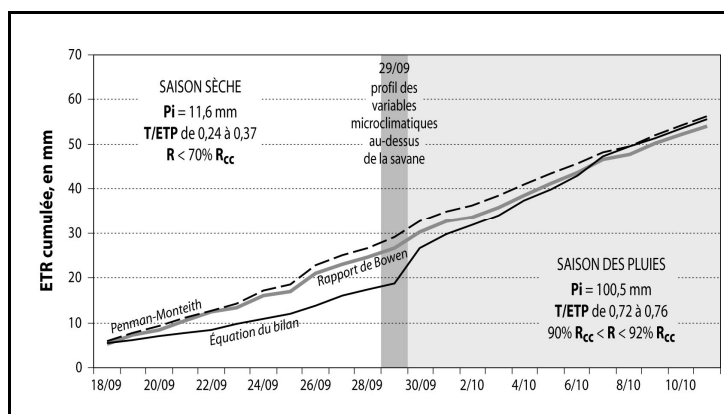


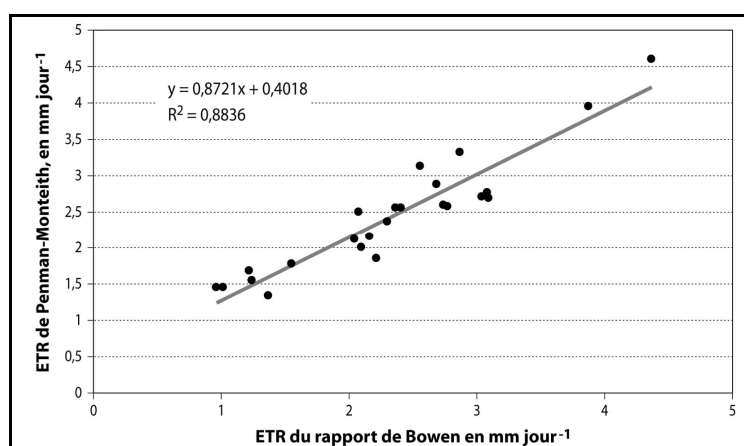
Figure 4 : Evapotranspiration réelle de la savane à *Loudetia arundinacea* ; valeurs cumulées obtenues par les méthodes de l'équation du bilan, de l'équation de Penman-Monteith et du rapport de Bowen, sur la période du 18 septembre au 11 octobre 1998. Actual evapotranspiration of savannah with *Loudetia arundinacea*; cumulated values obtained from the soil-water balance equation, Penman-Monteith equation and Bowen-ratio method, during the period from September 18 to October 11, 1998.



Le bilan utilise un pas de temps hebdomadaire et c'est donc par calcul que l'on obtient des valeurs journalières. L'équation de Penman-Monteith et le rapport de Bowen utilisent un pas de temps journalier, ce sont donc ces deux méthodes que nous comparerons (figure 5) : l'ETR issue respectivement de l'équation de Penman-Monteith et du rapport de Bowen est de 2,17 et 2,39 mm jour^{-1} en « saison sèche », puis 2,51 et 2,50 mm jour^{-1} en « saison des pluies ». La différence d'environ 10% (de 0,22 mm jour^{-1} ; tableau 1) lors de la « saison sèche » s'explique par l'hétérogénéité de la contribution des feuilles au sein du couvert au flux transpiratoire.

L'approche de Penman-Monteith, méthode « simple », où l'indice foliaire (LAI) est une constante, est insuffisant : l'indice foliaire contribuant à la cinétique du flux transpiratoire est une fonction complexe dépendante de nombreux facteurs (position des feuilles, conditions de croissance, caractéristiques métaboliques...). Le rapport de Bowen ne fait pas intervenir le LAI et cette méthode se rapproche au mieux du phénomène réel puisque l'on mesure la sortie réelle de vapeur d'eau. Lors de la « saison des pluies » les deux méthodes donnent des résultats similaires : le couvert végétal est assimilé à une « grande feuille », surface végétale humide pour laquelle le processus d'évapotranspiration du couvert est assimilé au processus de l'évaporation de l'eau libre ; la résistance du couvert (r_c) tend alors vers zéro et l'ETR tend vers l'ETP ; la grandeur limitante, dans les deux cas, est l'énergie disponible (R_n) plutôt que r_c .

Figure 5 : Relation entre l'évapotranspiration réelle de la savane à *Loudetia arundinacea* issue de l'équation de Penman-Monteith et du rapport de Bowen ; valeurs journalières lors de la période du 18 septembre au 11 octobre 1998. *Relationship between the actual evapotranspiration of savannah with Loudetia arundinacea obtained from Penman-Monteith and Bowen-ratio method; daily values during the period from September 18 to October 11, 1998.*



2.3. Résistance du couvert de la savane

La résistance du couvert (r_c) dépend des résistances stomatiques des feuilles de ce couvert (r_s) et de l'indice foliaire (LAI) ; la transpiration du couvert est la somme des transpirations de l'ensemble des feuilles, chaque feuille ayant une résistance stomatique donnée instantanée dépendante de ses caractéristiques physiologiques propres et du microclimat auquel elle est soumise. Pour estimer la résistance du couvert (r_c), les études ont commencé historiquement par supposer que toutes les feuilles étaient semblables (mêmes caractéristiques physiologiques, même microclimat ; Monteith, 1965). Saugier et Katerji (1991) proposent un calcul reposant sur la décroissance exponentielle du rayonnement avec l'indice foliaire cumulé à partir du sommet du couvert et sur l'intégration de la variation de la résistance stomatique avec le rayonnement reçu. Nous calculerons r_c à partir des mesures du flux de chaleur latente (λE) au dessus du couvert par la méthode micrométéorologique du rapport de Bowen et nous la comparons à la valeur r_c issue du modèle de Jarvis-Stewart (Stewart, 1988) obtenue par Founa-Toutou (2000). Dans ces deux cas de figure, le couvert végétal fermé est assimilé à une « grande feuille » dont il faut connaître la résistance aérodynamique (r_a). L'équation de Penman-Monteith intègre la résistance stomatique issue du modèle de Jarvis-Stewart (mesures en parallèle de résistance stomatique et des facteurs du milieu : R_g , T_{air} , PAR, $\Psi_{feuille}$, de, R...). Ces deux approches permettent de faire une analyse déterministe de la résistance stomatique ; dans les deux cas, la mesure de l'indice foliaire s'avère déterminante dans l'estimation de cette résistance (Nizinski, 2007).

Nous avons estimé la résistance moyenne journalière du couvert à partir du rapport de Bowen utilisant l'équation [13]. La résistance du couvert moyenne journalière vaut 317 s m^{-1} , avec 355 s m^{-1} pour la « saison sèche » et 279 s m^{-1} pour la « saison des pluies » (tableau 1). Comme attendu, la résistance du couvert lors de la « saison sèche » est supérieure de 76 s m^{-1} (24% de r_c moyenne) à celle de la « saison des pluies », et ce, à cause de la différence d'indice

foliaire, l'indice en « saison sèche » (1,6 - 1,9) étant inférieur à celui de la « saison des pluies » (1,9 - 2,2). Nous avons comparé nos valeurs de résistance du couvert calculées à partir du rapport de Bowen à celles de Founa-Toutou (2000) obtenues du modèle de Jarvis-Stewart (figure 3) et qui ont été respectivement de 271 s m^{-1} (moyenne journalière), de 372 s m^{-1} (« saison sèche ») et de 321 s m^{-1} (« saison des pluies ») (tableau 1). Dans le modèle empirique de Jarvis-Stewart, la transpiration du couvert est la somme des transpirations des feuilles composant ce couvert, le modèle suppose que toutes les feuilles possèdent les mêmes caractéristiques biologiques (âge, masse par unité de surface, teneur en azote, capacité photosynthétique, résistance stomatique minimale,...) et qu'elles sont soumises au même microclimat (éclairage, déficit de saturation de l'air, températures,...) ; le modèle donne des valeurs de résistance du couvert satisfaisantes pour les forêts et couverts épars (petit gradients à l'intérieur du couvert), mais moins satisfaisantes pour les couverts herbacés denses. Connaissant la résistance du couvert obtenue par le rapport de Bowen et connaissant l'indice foliaire, on peut calculer la résistance stomatique moyenne d'une feuille (pour un pas de temps de 20 minutes, temps de scrutation du rapport de Bowen) et la comparer avec la résistance stomatique moyenne issue du modèle Jarvis-Stewart et avec les résistances stomatiques d'un échantillon optimal de feuilles, résistances mesurées au poromètre de façon synchrone. Cette méthode du rapport de Bowen associée à des mesures de porométrie permet d'analyser « l'indice foliaire efficace » (surface des feuilles qui participent effectivement au flux transpiratoire) qui peut être décomposée par strate et pour différents pas de temps.

Conclusion

La méthode du rapport de Bowen a permis de quantifier l'évapotranspiration réelle de la savane à partir des mesures des gradients de température et d'humidité de l'air, du rayonnement net et du flux de chaleur dans le sol. Ses avantages en sont la rapidité de mise en place du dispositif de mesure, une résolution temporelle des mesures inférieure à une heure, une continuité des mesures, une bonne intégration des hétérogénéités du flux de chaleur latente d'évaporation du couvert, sachant que les exigences d'application de la méthode sont un peuplement considéré comme homogène horizontalement et verticalement, une surface de peuplement dont la plus petite dimension est cent fois supérieure à la hauteur de ce peuplement, un pas de temps égal ou supérieur à vingt minutes, et seulement des flux de chaleur et de masse verticaux.

Le choix du laboratoire mobile a permis de faire un « *screening* » systématique de la savane à des moments remarquables du cycle phénologique et de faire en parallèle d'autres mesures des potentiels hydriques des feuilles et du sol, l'indice foliaire. Ce dispositif est adapté aux recherches agro-météorologiques et éco-physiologiques faites en milieu tropical avec des équipes restreintes. Pour des couverts herbacés denses, comme c'est le cas d'une savane, la méthode du rapport de Bowen permettra d'analyser « l'indice foliaire efficace » (surface des feuilles qui participent effectivement au flux transpiratoire).

Remerciements : Cette étude a été financée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Les auteurs remercient Jean-Baptiste Diazenza, pour son aide sur le terrain.

Bibliographie

AMARAKOON D., CHEN A. et MCLEAN P., 2000 : Estimating daytime latent heat flux and evapotranspiration in Jamaica. *Agricultural and Forest Meteorology*, **102**, 113-124.

BOUILLET J.P., LACLAU J.P., NIZINSKI J.J. et NZILA J.D., 1999 : La Fertilité des sols sous Eucalyptus : Impact des plantations autour de Pointe Noire (Congo). *Le Flamboyant*, **49**, 26-28.

BOWEN I.S., 1926 : The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, **27**, 779-787.

BRUNT D., 1939 : *Physical and Dynamical Meteorology*. University Press, Cambridge, 450 pages.

FOUNA-TOUTOU E.C., 2000 : *Eléments écophysologiques d'une plantation d'Eucalyptus et d'une savane au Kouilou, Congo*. Diplôme de fin d'études d'Ingénieur, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, 39 pages.

HEILMAN J.L. et BRITTIN C.L., 1989 : Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, **44**, 261-296.

MONTEITH J.L., 1965 : *Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms*. Symposia of the Soc. Exp. Biol., New York, Academic Press, **19**, 205-234.

NIZINSKI J.J., 2007 : *Etude et modélisation des échanges de masse et d'énergie dans les couverts végétaux*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Orléans, Orléans, 357 pages.

NIZINSKI J.J., LOUMETO J.J., AYOMA M.B., MABIALA A. et NSEMI R.N., 2001 : Durabilité de plantations d'Eucalyptus dans le bassin du Kouilou (Congo). *Le Flamboyant*, **54**, 14-17.

NIZINSKI J.J., MORAND D., LOUMETO J.J., GALAT-LUONG A. et GALAT G., 2008 : Bilan hydrique comparé d'une savane et d'une plantation dans le bassin du Kouilou (Congo-Brazzaville). *Climatologie*, **5**, 99-112.

OHMURA A., 1982 : Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio fluxer calculations. *Journal of Applied Meteorology*, **21**, 595-598.

PAW U.K.T. et MEYERS T.P., 1989 : Investigations with a higher-order canopy turbulence model into mean source-sink levels and bulk canopy resistances. *Agricultural and Forest Meteorology*, **47**, 259-271.

PENMAN H.L., 1948 : Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, **193**, 120-145.

PHILIP J.R., 1987 : A physical bound on the Bowen ratio. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **26**, 1043-1045.

REVFEIM K.J.A. et JORDAN R.B., 1976 : Precision of evaporation measurements using the Bowen ratio. *Boundary-Layer Meteorology*, **10**, 97-111.

RIOU C., 1975 : La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. ORSTOM, Paris, 236 pages.

SAUGIER B. et KATERJI N., 1991 : Some plant factors controlling evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, **54**, 263-277.

STEWART J.B., 1988 : Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **43**, 19-35.

THOM A.S., 1972 : Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **98**, 124-134.

VENNETIER P., 1968 : Pointe Noire et façade maritime du Congo-Brazzaville. ORSTOM, Paris, 458 pages.