BILAN HYDRIQUE COMPARE D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO)

Jerzy Jan NIZINSKI ¹, Dominique MORAND ², Jean-Joël LOUMETO ²,
Anh LUONG-GALAT ¹ et Gérard GALAT ¹

¹ Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
UR 060 CLIFA 'Climat et fonctionnement des agro-écosystèmes'
Centre IRD de Montpellier, 911 avenue Agropolis
B.P. 64501, 34394 Montpellier cedex 5, France
georges.nizinski@mpl.ird.fr

² Centre IRD
B.P. 1286
Pointe Noire, R.P. Congo

Résumé

Depuis 1950 environ, la savane du littoral congolais est progressivement plantée d'Eucalyptus en peuplements denses exploités par rotations d'environ sept ans. Pour apprécier la durabilité de ces plantations d'Eucalyptus, il faut faire l'étude comparée des bilans énergétique, carboné, minéral et hydrique des deux écosystèmes, l'écosystème d'origine, la savane, et l'écosystème artificiel qui lui a succédé, les plantations d'Eucalyptus. L'objectif de ce travail est d'étudier le bilan hydrique des deux écosystèmes et, plus particulièrement, leur évapotranspiration réelle (transpiration et évaporation). La futaie d'Eucalyptus étudiée est âgée de cinq ans (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*), a une hauteur moyenne de 24,2 m, une circonférence moyenne de 53,4 cm, une densité de 502 arbres ha⁻¹, une surface terrière de 11,0 m² ha⁻¹, un indice foliaire de 3,2 et un volume de bois de 118,5 m³ ha⁻¹. La savane étudiée est une savane à *Loudetia arundinacea*. On a mesuré toutes les semaines en saison des pluies de novembre 1996 à avril 1997, de novembre 1997 à avril 1998, de novembre 1998 à avril 1999 et en saison sèche, de juin à septembre 1997 et de juin à septembre 1998, les précipitations incidentes, les précipitations au sol (pluviomètres) et la réserve en eau du sol (sonde à neutrons, sonde TDR). L'évapotranspiration, l'interception et la transpiration de la plantation et de la savane ont été estimées à partir de l'équation du bilan hydrique. La transpiration de la plantation a aussi été estimée par la méthode du flux de sève. L'établissement des profils hydriques du sol (humidité volumique et potentiel hydrique en fonction de la profondeur) nous a donné les zones d'absorption préférentielle et la profondeur de sol exploitée par ces communautés : 5 m pour la plantation d'Eucalyptus et 3 m pour la savane. Le drainage dans la plantation est moindre que celui dans la savane ; cumulé sur trois ans, il est de 470,3 mm dans la plantation et de 827,3 mm dans la savane. La plantation d'Eucalyptus est un écosystème artificiel qui absorbe/transpire toute l'année et qui consomme toute l'eau disponible. La succession de plusieurs années déficitaires réduira la production de bois de la plantation, mais sachant qu'entre 1950 et 1998, il n'y a eu qu'un seul épisode de quatre années déficitaires successives dans le bassin du Kouilou, et compte tenu de la durée de rotation de sept ans, cet épisode « sec » ne compromet pas la survie de la plantation, mais réduit seulement sa production. La savane a un cycle de végétation tel qu'à la fin de la saison sèche (septembre), il subsiste dans le sol de l'eau qui représente 15% de R_{RU}, lui permettant de subir trois années déficitaires successives sans incidence sur sa production.

Mots clés : durabilité, plantation, Eucalyptus, savane, bilan d'eau, évapotranspiration.

Abstract

Soil-water balance of savannah and of Eucalyptus plantation in the Kouilou basin (D.R. of Congo)

Since 1950 approximately, the savannah of the littoral Congolese is gradually planted of Eucalyptus in dense populations exploited by rotations of seven years. To appreciate the sustainability of these plantations of Eucalyptus, it is necessary to make compared study of energy, carbon, mineral and water balances of two ecosystems, the origin ecosystem, the savannah, and home-made ecosystem that have succeeded it, Eucalyptus plantations. The aim of this work is to study the water balance of the two ecosystems and more particularly their actual evapotranspiration (transpiration and evaporation). In a five years-old Eucalyptus plantation (*Eucalyptus*

PF1 and *Eucalyptus 12ABL*saligna*), mean height is 24.2 m, mean stem diameter at soil level is 0.17 m, stand density is 502 trees ha⁻¹, total basal area is 11.0 m² ha⁻¹, leaf area index is 3.2, total wood production is 118.5 m³ ha⁻¹) and in a savannah with *Loudezia arundinacea*, gross precipitation (Pi), throughfall (rain gauges) and soil water content (neutron and TDR probe) were measured weekly during the rainy season from November 1996 to April 1997, from November 1997 to April 1998, from November 1998 to April 1999 and during the dry season, from June to September 1997 and from June to September 1998. Actual evapotranspiration (E_a), net interception and transpiration were derived from the water balance equation method. Moreover, transpiration was measured using the radial flow meter. The soil water profiles (soil water content and potential plotted to soil depth) were established, giving an account of preferential water uptake zones and rooting depths of Eucalyptus plantation (5 m depth) and savannah species (3 m depth). Throughfall, net interception during the rainy seasons (1996-97, 1997-98 and 1998-99) were 867.1 mm and 112.1 mm (88.7 and 11.3% of Pi) for the Eucalyptus plantation and 878.1 mm and 101.1 mm (90.1% and 9.9% of Pi) for the savannah, respectively. The mean seasonal daily actual transpiration of the plantation and savannah was 3.6 and 2.6 mm day⁻¹ during the rainy season (November to April) and 1.4 and 0.9 mm day⁻¹ during the dry season (June to September); the mean seasonal daily actual evapotranspiration of the plantation and the savannah was 4.2 and 3.2 mm day⁻¹ (rainy season) and 1.4 and 0.9 mm day⁻¹ (dry season); the total seasonal actual evapotranspiration was 767.4 mm and 579.0 mm (rainy season) and 183.0 mm and 121.5 mm (dry season), with total annual respectively 1127.1 mm for a plantation (94.9% of Pi) and 820.7 mm for a savannah (69.1% of % of Pi). During the year transpiration/potential evapotranspiration ratio (T/E_p) is related to the soil-water depletion (T/E_p ratio was 0.79 and not reduced from field capacity (R_{FC}=365 mm) until 65 % of R_{FC} (255 mm), and then decreased quickly to near zero (0-0.2) at wilting point or 53.1% of R_{FC} (R_{FC}=328 mm). The drainage out of rooting depths of savannah has occurred during the rainy season of 1997-1998 and 1998-1999, was of 827.3 mm, a total over 3 years (0, 389.7 and 437.6 mm); while of rooting depths of Eucalyptus plantation was of 470.3 mm (0, 207.1 and 263.2 mm), a difference in drainage between two ecosystems of 357.0 mm a total over these three years (0, 182.6 and 174.4 mm). The Eucalyptus plantation is the home-made ecosystem which takes up/transpires every day of year and uses all available water. The succession of several rain-deficient years will reduce the production from woods of the plantation, but knowing that between 1950 and 1998, there has been only an alone four episode successive rain-deficient years, and account held of the duration of rotation that are seven years, this « dry » episode does not compromise the surviving of the plantation, makes only reduce its wood production. The savannah has a cycle of vegetation such that at the end of the dry season (September), it remains the water in the rooting depths of savannah (15% of R_{AW}), allowing to undergo three successive rain-deficient years without impact on its production.

Keywords: sustainability, plantation, Eucalyptus, savannah, soil-water balance, evapotranspiration.

Introduction

Depuis 1950 environ, la savane du littoral congolais (figure 1) est progressivement plantée d'Eucalyptus en peuplements denses exploités par rotations d'environ sept ans (Laclau *et al.*, 2000). Des plantations sont dites durables si elles répondent à de multiples critères, sociologiques, politiques, économiques et écologiques qui ont été redéfinis par le rapport de Brundtland (World Commission on Environment and Development, 1987). La durabilité de ces plantations d'Eucalyptus correspondrait à la situation théorique pour laquelle un écosystème proche de la savane d'origine succéderait à ces plantations si on cessait de les cultiver, ce qui suppose que les conditions climatiques régionales et pédologiques n'aient pas été radicalement modifiées par l'existence de ces plantations. Pour apprécier la durabilité de ces plantations d'Eucalyptus, il faut faire l'étude comparée des bilans énergétiques, carbonés, minéraux et hydriques des deux écosystèmes, l'écosystème d'origine, la savane, et l'écosystème artificiel qui lui a succédé, les plantations d'Eucalyptus.

L'objectif de ce travail est d'étudier le bilan hydrique des deux écosystèmes et, plus particulièrement, leur évapotranspiration réelle (transpiration et évaporation). La transpiration est le moteur du transfert de l'eau à travers la plante : il se crée une différence de potentiel hydrique entre les feuilles et les racines qui est à l'origine du flux d'absorption (une pompe hydraulique aspirante transférant l'eau du sol vers l'atmosphère, *i.e.* le continuum sol-plante-atmosphère). La transpiration d'un écosystème est déterminée par :

- la demande évaporative de l'atmosphère (évapotranspiration potentielle) dépendant du rayonnement solaire, du déficit de l'humidité de l'air, de la température et de la vitesse du vent ;
- les mécanismes physiologiques de régulation stomatique du couvert, dépendant du génotype ;
- la structure du couvert végétal et, plus particulièrement, l'indice foliaire ;
- la quantité d'eau disponible pour la végétation, via la réserve utile du sol ;

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude : région du Kouilou, sur la façade atlantique de la République du Congo (surface de 13 315 km², située entre le Cabinda au sud et le Gabon au nord) ; 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 continent africain au sud-ouest) avec des précipitations moyennes annuelles de $P_{49-98}=1188,4$ mm, une évapotranspiration potentielle (Penman) de 1390,4 mm.an⁻¹ ($ETP_{92-98}=3,8$ mm jour⁻¹; $ETP_{PLUIES}=4,2$ mm jour⁻¹, $ETP_{SECHE}=3,2$ mm jour⁻¹), une température moyenne de l'air de 24,9°C ($t_{max}=28,2$ °C, $t_{min}=21,9$ °C), une humidité relative de l'air de 81,1% ($H_{max}=95,5\%$, $H_{min}=66,4\%$) ; moyennes calculées sur la période 1949-1998 à la station de référence de Pointe-Noire. 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 des mois de transition. La zone d'étude se situe dans le bassin sédimentaire côtier tertiaire (pliocène), de la série de cirques avec grès argileux, sables et argile. Les sols des stations d'études sont des sols ferralitiques fortement dessaturés à texture sablo-argileuse (Vennetier, 1968). Les deux stations d'études sont situées à 40 km de Pointe-Noire à proximité du lieu-dit Kondi (latitude 4°34'S, longitude 11°54'E, altitude : 125 m). *Location of the study area (region of Kouilou, D.R. of Congo).*

L'Eucalyptus a été choisi pour sa croissance rapide, les rotations étant de sept ans. Des plantations d'Eucalyptus durables seraient des plantations dont la consommation en eau ne serait pas « excessive », les clones utilisés consommant moins que d'autres clones d'Eucalyptus ou que certains autres espèces (par exemple *Pinus caribaea*).

Cette étude fournira les données nécessaires à la calibration d'un modèle hydrique permettant aux équipes de l'UR2PI de Pointe-Noire (Unité de Recherche sur la Productivité des Plantations Industrielles), du CIRAD et de l'INRA de Nancy d'étudier sur les mêmes sites le cycle des éléments minéraux majeurs (N, P, K, Ca, Mg) constituant des aspects de la durabilité de ces plantations d'Eucalyptus (Bouillet *et al.*, 1999).

1. Matériel et méthodes, stations d'études et dispositif expérimental

L'expression simplifiée du bilan hydrique du sol d'une savane (photo 1) ou d'une plantation d'Eucalyptus (photo 2) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_i = ETR + D \pm \Delta R / \Delta t \quad [1]$$

$$\text{où } ETR = T + In + Es \quad [2]$$

$$\text{et } In = P_i - (Ps + Ec) \quad [3]$$

avec : P_i , précipitations incidentes, en mm jour⁻¹ ; ETR, évapotranspiration réelle du peuplement, en mm jour⁻¹ ; D, drainage, en mm jour⁻¹ ; ΔR , variation de la réserve en eau du sol, en mm ; Δt , pas de temps des calculs, en jours ; T, transpiration, en mm jour⁻¹ ; In, interception nette, en mm jour⁻¹ ; Es, évaporation du sol, en mm jour⁻¹ ; Ps, précipitations au sol, en mm jour⁻¹ ; Ec, écoulement le long des troncs pour la plantation, en mm jour⁻¹.

Photo 1 : Vue de la station d'étude n°1 : une savane dominée à 90% par *Lutetia arundinacea* (hauteur moyenne de 1,5 m ; biomasse maximale de 3,5 tonnes ha⁻¹ et masse morte maximale de 4,6 tonnes ha⁻¹, indice foliaire de 4,3 ; zone racinaire de 3 m ; capacité au champ $R_{cc}=363$ mm ; point de flétrissement permanent $R_{pfp}=181,8$ mm ; réserve utile $R_{ru}=181,2$ mm). *View of the first station studied.*

Photo 2 : Vue de la station d'étude n°2 : une futaie d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus I2ABL*saligna* plantés en janvier 1992 à l'état de plantules issues de boutures, plantules d'environ 0,3 m de hauteur) de cinq ans plantés selon des rangs orientés sud-ouest avec un écartement de 4 m entre deux individus d'une même ligne et un écartement de 4,7 m entre deux lignes : hauteur moyenne de 24,2 m ; circonférence moyenne de 53,4 cm ; densité de 502 arbres ha⁻¹ ; surface terrière de 11,0 m² ha⁻¹ ; indice foliaire de 3,2 ; volume de bois de 118,5 m³ ha⁻¹ ; zone racinaire de 5 m ; capacité au champ $R_{cc}=617,6$ mm ; point de flétrissement permanent $R_{pfp}=309,2$ mm ; réserve utile $R_{ru}=308,4$ mm). *View of the second station studied.*

Cette expression considère comme négligeable l'évaporation directe du sol et de la litière, approximation raisonnable seulement en période de dessèchement. La réserve en eau du profil du sol (R), les précipitations au dessus du peuplement (P_i) et au sol (Ps) ainsi que l'écoulement le long des troncs (Ec) ont été mesurés ; les valeurs du drainage (D), l'évapotranspiration (ETR), l'interception (In) et la transpiration (T) de la plantation et de la savane ont été estimées à partir de l'équation du bilan.

Par ailleurs, la transpiration de la plantation est estimée par la méthode du flux de sève : l'eau ayant une très forte chaleur massique, la méthode est basée sur la mesure de la vitesse de déplacement d'une onde thermique suite à l'émission d'une brève impulsion de chaleur (Granier, 1987). Dans l'équation du bilan, on suppose que l'ETR est égale à l'ETP (évapotranspiration potentielle) en période humide (réserve du sol à la capacité au champ, R_{CC}) et, au contraire, un drainage nul en période sèche (réserve du sol inférieure à la capacité au champ). Dans le bilan hydrique du sol à l'échelle d'une journée, les valeurs de l'ETR sont calculées comme suit :

$$\text{Si } R \geq R_{CC}, \text{ alors } ETR = ETP \text{ et } D = P_i - ETP \pm \Delta R / \Delta t \quad [4]$$

$$\text{Si } R < R_{CC}, \text{ alors } D = 0 \text{ et } ETR = P_i \pm \Delta R / \Delta t \quad [5]$$

avec ETP, évapotranspiration potentielle en mm jour⁻¹.

Pour estimer l'évapotranspiration potentielle, nous avons utilisé la formule de Penman (1948). Les valeurs ont été calculées chaque jour pour les deux stations d'études, puis cumulées sur les durées correspondant aux intervalles de mesures. Cette équation est applicable pour un couvert dense et étendu (*i.e.* > 100 m²).

$$ETP = (\Delta R_n / \lambda + \gamma E_a) / (\Delta + \gamma) \quad [6]$$

avec : R_n , rayonnement net ou effectif, en W m⁻²; λ , chaleur latente de vaporisation, en J kg⁻¹ (2451,8 J g⁻¹) ; γ , constante psychrométrique, en kPa °C⁻¹ ; E_a , évaporation d'une surface dont la température serait celle de l'air, mesurée sous abri, en mm jour⁻¹; Δ , dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en kPa °C⁻¹,

$$\text{où : } R_n = (1-a)R_g - (R_a - R_t) \quad [7]$$

Avec : R_n , rayonnement net ou effectif, en W m⁻²; R_g , rayonnement solaire global, en W m⁻²; R_a , rayonnement atmosphérique, en W m⁻²; R_t , rayonnement terrestre, en W m⁻²; a , albédo de la surface (albédo de la plantation d'Eucalyptus : $a=0,13$; albédo de la savane : $a=0,25$).

L'hypothèse d'un drainage nul lorsque $R < R_{CC}$ est liée à la texture sableuse du sol, qui implique une chute très rapide de conductivité hydrique avec le dessèchement du sol. Elle n'est strictement vraie que lorsque l'humidité de l'horizon le plus profond est devenue inférieure de quelques points à sa valeur à la capacité au champ. Dans les deux cas (équations [4] et [5]), la transpiration du peuplement est calculée en soustrayant l'interception nette (I_n) calculée à l'aide de l'équation [8] de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

$$T = ETR - I_n \quad [8]$$

Ces calculs utilisent les notions de capacité de rétention en eau maximale du sol de la zone racinaire (capacité au champ, R_{CC}), de capacité de rétention minimale (point de flétrissement permanent, R_{PFP}) et d'évapotranspiration potentielle (ETP). La zone exploitée par les racines a été bien délimitée (5 m pour la plantation et 3 m pour la savane) ; d'autre part, les caractéristiques topographiques et pédologiques sont telles qu'il n'y a sur les stations d'expérimentation ni nappe phréatique proche, ni ruissellement en surface et dans le sol (pente proche de ± 1 %). Nous avons déterminé les valeurs de R_{CC} et R_{PFP} *in situ* comme étant les valeurs maximale et minimale de la réserve en eau. Le tableau 1 synthétise l'ensemble des mesures effectuées (type de mesure, fréquence, caractéristique du matériel utilisé).

Les données météorologiques proviennent de la station météorologique de Pointe-Noire, située à 40 km au sud des stations d'études (Direction de l'Exploitation Météorologique de l'ASECNA, Aéroport de Pointe-Noire, latitude 4°49'S, longitude 11°54'E, altitude 16 m IGN). Les données météorologiques issues respectivement de la station météorologique et du site d'étude ont été comparées en 1996 par Nizinski et al. (2002) et sont similaires.

fréquence	type de mesure	matériel
hebdomadaire	précipitations incidentes précipitations au sol écoulement le long des troncs réserve en eau du sol	pluviomètre pluviomètres gouttières sonde à neutrons tarière sonde TDR
journalière	température moyenne de l'air humidité relative de l'air pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air pression atmosphérique durée d'insolation vitesse du vent	station météorologique
Ces mesures en continu sont stockées sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger 21XL (Campbell)	pas de temps 1 heure	flux de sève potentiel foliaire transpiration foliaire résistance stomatique potentiel hydrique du sol thermocouples chambre à pression PMS poromètre AP4, Delta-T-Devices poromètre AP4, Delta-T-Devices tensiomètres
	pas de temps 20 minutes	humidité relative de l'air température moyenne de l'air vitesse du vent rayonnement global rayonnement net température moyenne du sol sonde " Vaisala " sonde " Vaisala " anémomètre " A100-Vector " pyranomètre Licor bilanmètre REBS/Q-7, Campbell sonde 107, Campbell mesures à : 2 m et 5 m 6 m 0,05 m et 0,15 m

Tableau 1 : Acquisition des données, type et fréquence des mesures et caractéristiques de matériel. Data acquisition, type and frequency of measurements, characteristics of equipments.

2. Résultats et discussion

2.1. Climat local et type de couvert

Les résultats concernent la période allant du 17 février 1997 au 26 juillet 1999. Nous nous servons de la classification de Vennetier (1968) qui décompose l'année pluviométrique en saison des pluies de novembre à avril (ici 1996-97, 1997-98 et 1998-99), saison sèche de juin à septembre (ici 1997 et 1998) ; les mois de mai et octobre sont considérés comme des mois de transition. Les précipitations incidentes annuelles (P_i) et l'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP) ont été respectivement en 1996 de 1149,8 et 1352,8 mm an⁻¹ ; pour 1997, de 1231,3 et 1356,7 mm an⁻¹ ; pour 1998, de 1273,8 et 1389,5 mm an⁻¹. Ces trois années sont très proches des moyennes annuelles de P_i et de ETP établies de 1949 à 1998 pour P_i et de 1992 à 1998 pour ETP, respectivement P_{i49-98} de 1188,4 mm an⁻¹ et ETP_{92-98} de 1390,4 mm an⁻¹ (tableau 2). Nous avons ensuite comparé les précipitations incidentes à la moyenne calculée sur 49 ans ($P_{i49-98}=1034,3$ mm) : la saison des pluies 1996-97 est déficitaire par rapport à la moyenne ($P_{i96-97}=459$ mm, soit 44% de P_{i49-98}) ; les précipitations de la saison des pluies 1997-98 ($P_{i97-98}=1338$ mm, soit 129% de P_{i49-98}) et de celle de 1998-99 ($P_{i98-99}=1140$ mm, soit 110% de P_{i49-98}) sont supérieures à la moyenne. L'ETP est proche de la moyenne

1992-98 ($ETP_{92-98}=1390 \text{ mm an}^{-1}$) sur toute l'étude soit, pour 1996, 1353 mm an^{-1} (97% de ETP_{92-98}), pour 1997, 1357 mm an^{-1} (98% de ETP_{92-98}), pour 1998, 1389 mm an^{-1} (99% de ETP_{92-98}).

	SAISONS DES PLUIES - 1er novembre au 30 avril (181 jours)								SAISONS SÈCHES - 1er juin au 30 septembre (122 jours)					
	1996-1997		1997-1998		1998-1999		moyenne 1996-1999		1997		1998		moyenne 1997-1998	
	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane
Rayonnement net (Rn) W m ⁻²	416,9	345,5	441,9	366,6	435,5	359,8	431,4	357,3	272,4	223,2	290,3	238,1	281,4	230,7
Évapotranspiration potentielle (ETP) mm mm jour ⁻¹	780,5 4,3	717,2 4,0	851,5 4,7	779,2 4,3	856,7 4,7	785,0 4,3	829,6 4,6	760,5 4,2	373,9 3,1	347,8 2,9	402,4 3,3	3,1	388,2 3,2	361,2 3,0
Précipitations incidentes (Pi) mm mm jour ⁻¹	459,3 2,5	459,3 2,5	1338,5 7,4	1338,5 7,4	1139,9 6,3	1139,9 6,3	979,2 5,4	979,2 5,4	15,5 0,1	15,5 0,1	63,5 0,5	63,5 0,5	39,5 0,3	39,5 0,3
Précipitations au sol (Ps) mm mm jour ⁻¹ % de Pi	412,3 2,3 89,8	422,5 2,3 92,0	1198,0 6,6 89,5	1206,3 6,7 90,1	991,0 5,5 86,9	1005,5 5,6 88,2	867,1 4,8 88,7	878,1 4,9 90,1	9,8 0,1 63,1	13,4 0,1 86,6	39,9 0,3 62,9	47,1 0,4 74,2	24,8 0,2 63,0	30,3 0,2 80,4
Écoulement le long des troncs (Ec) mm mm jour ⁻¹ % de Pi	9,2 0,1 2,0		26,8 0,1 2,0		22,8 0,1 2,0		19,6 0,1 2,0		0,3 0,0 2,0		1,3 0,0 2,0		0,8 0,0 2,0	
Interception nette (In) mm mm jour ⁻¹ % de Pi	47,0 0,3 10,2	36,8 0,2 8,0	140,5 0,8 10,5	132,2 0,7 9,9	148,9 0,8 13,1	134,4 0,7 11,8	112,1 0,6 11,3	101,1 0,6 9,9	5,7 0,0 36,9	2,1 0,0 13,4	23,6 0,2 37,1	16,4 0,1 25,8	14,7 0,1 37,0	9,2 0,1 19,6
Transpiration (T) mm mm jour ⁻¹	693,2 3,8	436,2 2,4	707,8 3,9	584,6 3,2	564,7 3,1	412,7 2,3	655,2 3,6	477,8 2,6	93,9 0,8	112,2 0,9	242,8 2,0	112,2 0,9	168,4 1,4	112,2 0,9
Évapotranspiration (ETR) mm mm jour ⁻¹	740,2 4,1	473,0 2,6	848,3 4,7	716,9 4,0	713,6 3,9	547,1 3,0	767,4 4,2	579,0 3,2	99,7 0,8	114,3 0,9	266,4 2,2	128,6 1,1	183,0 1,5	121,5 1,0
Drainage (D) D = Ps+Ec-ETR mm R _{30.04} , mm R _{1.11} , mm dR = R _{30.04} - R _{1.11} , mm D = Ps+Ec-ETR-dR mm mm jour ⁻¹	0,0 377,6 361,1 16,5 0,0 0,0	0,0 360,9 222,3 138,5 0,0 0,0	376,4 508,1 338,7 169,4 207,1 1,1	489,4 337,8 238,1 99,7 389,7 2,2	300,2 462,8 425,8 37,0 263,2 1,5	458,4 347,0 326,2 20,8 437,6 2,4	225,6 315,9		0,0 345,3 311,8 33,5 0,0	0,0 298,6 230,2 68,5 0,0	0,0 484,8 380,3 104,5 0,0	0,0 297,8 344,1 -46,3 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0

Tableau 2 : Rayonnement net (Rn), précipitations incidentes (Pi), précipitations au sol (Ps), interception nette (In), transpiration (T), drainage (D), évapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP). Valeurs cumulées durant les saisons des pluies et saisons sèches du 17 février 1997 au 26 juillet 1999 : (a) plantation d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*) ; (b) savane à *Loudetia arundinacea*. Net radiation (Rn), incident precipitation (Pi), precipitation on the ground (Ps), net interception (In), transpiration (T), drainage (D), actual evapotranspiration (ETR) and potential evapotranspiration (ETP) for (a) an eucalyptus plantations and (b) a savannah.

Le peuplement d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*) a des feuilles toute l'année (indice foliaire de 3,2), donc absorbe/transpire toute l'année. Les herbacées de la savane (dominée par *Lutetia arundinacea*, présence de *Elyonrus brazzae*, *Ctenium newtonii*, *Rhynchelytrum nerviglume*, *Lutetia simplex*, *Probelaniceps*, *Eroseta glomeratum*, *Cassia mimosoides*, *Cyanotis*) sont des plantes annuelles qui absorbent et transpirent pendant la saison des pluies, et pendant les mois de transition (mai et octobre), avec un indice foliaire moyen de 2,9 et un maximum de 4,1 en février (Nizinski *et al.*, 2002).

2.2. Couverts arborescent et herbacée : incidence sur les éléments du bilan hydrique

Le bilan hydrique du sol dépend du type de couvert (par sa structure : étendue, taille, rugosité, présence ou absence des feuilles, pigmentations, etc), le type de couvert conditionnant le bilan radiatif et énergétique Rn – voir équation [7]) : la quantité de rayonnement solaire absorbée par les surfaces (dépendant de l'albédo) est dissipée, pour l'essentiel, dans l'air environnant sous forme de chaleur latente (λE ; utilisé dans le processus d'évaporation d'eau) et sous forme de chaleur sensible (H ; température ambiante). Les valeurs de l'albédo utilisées dans le calcul de l'ETP pour les années 1996 et 1997 ($a_{\text{EUCALYPTUS}}=0,13$ et $a_{\text{SAVANE}}=0,25$) sont issues de la bibliographie de Pinker *et al.*, (1980). Ces

valeurs ont été vérifiées par des mesures *in situ* en septembre 1998 ($a_{\text{EUCALPTUS}}=0,12$ et $a_{\text{SAVANE}}=0,23$; Nizinski *et al.*, 2002).

Pour la période 1992-98 (durée de vie prévue de la plantation étudiée ; tableau 2), la moyenne du **rayonnement net** moyen journalier (W m^{-2}) est pour la plantation et pour la savane respectivement de 387 et 320 W m^{-2} (voir le détail des valeurs de la saison des pluies et de la saison sèche ; tableau 2). Ainsi, la quantité d'énergie disponible pour la plantation est supérieure à l'énergie disponible pour la savane de 74 W m^{-2} en saison des pluies et de 51 W m^{-2} en saison sèche, d'où une quantité d'énergie utilisée pour évaporer l'eau supérieure au sein de la plantation par rapport à la savane. Le rayonnement net moyen journalier pendant les années 1996, 1997 et 1998 (tableau 2) est inférieur à la moyenne établie sur la période 1992-98 ; nous avons, pour la plantation et la savane, respectivement 3385 et 319 W m^{-2} en 1996 ; 367 et 303 W m^{-2} en 1997 ; 377 et 311 W m^{-2} en 1998.

Les valeurs de R_n de la savane (moyenne sur les trois années étudiées) sont comparées à celles obtenues par Riou (1975) au Centre ORSTOM de Brazzaville pour un gazon bien alimenté en eau pour la période 1968-71 (240 W m^{-2} en saison des pluies et 166 W m^{-2} en saison sèche). Ces valeurs sont supérieures respectivement de 117 et de 65 W m^{-2} aux nôtres, la différence étant due au type de surface et à la durée d'insolation de Pointe-Noire supérieure à celle de Brazzaville.

L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle et moyenne journalière calculée sur la période 1992-98 est de 1395 mm an^{-1} (3,8 mm jour^{-1} sur l'année, 4,1 en saison de pluies et 3,1 en saison sèche). Elle est proche de celle estimée par Riou (1975), calculée suivant la même formule de Penman pour la région de Brazzaville ($\text{ETP}_{68-71} = 1420 \text{ mm an}^{-1}$). L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle et moyenne journalière calculée sur la période 1996-98 (tableau 2) a été respectivement pour la plantation et pour la savane de 830 et de 760 mm (4,6 et 4,2 mm jour^{-1}) en saison des pluies et de 388 et de 361 (3,2 et 3 mm jour^{-1}) en saison sèche.

Les précipitations au sol et l'interception nette moyenne sur les trois saisons des pluies s'élèvent respectivement à 867 et 112 mm (89 et 11% de P_i) pour la plantation d'Eucalyptus et à 878 et 101 mm (90% et 10% de P_i) pour la savane. Pour la plantation d'Eucalyptus, les valeurs sont proches de celles obtenues par George (1978) pour un peuplement d'*Eucalyptus tereticornis* en Inde âgé de 6 ans ($P_i=1670 \text{ mm an}^{-1}$) pour lequel $I_n=12\%$ de P_i ; nous citerons aussi Calder (1986) concernant un peuplement d'*Eucalyptus saligna* âgé de 6 ans au Brésil ($P_i=1280 \text{ mm an}^{-1}$) pour lequel $I_n=12\%$ de P_i , ainsi que Smith (1974) concernant un peuplement d'*Eucalyptus regnans* en Australie ($P_i=810 \text{ mm an}^{-1}$) pour lequel $I_n=11\%$ de P_i . En moyenne, sur les trois années étudiées, les entrées d'eau sous forme de précipitations au sol de la plantation sont inférieures de 11 mm à celles de la savane ; mais si on ajoute l'écoulement le long des troncs (19,6 mm), les entrées d'eau dans la plantation sont alors de 8,6 mm supérieures à celles de la savane. La capacité maximale de rétention en eau des deux types de couvert, 0,9 mm pour la plantation et 0,6 mm pour la savane, explique ces valeurs ainsi que celles de l'interception nette. On comparera les valeurs de capacité maximale de rétention en eau du couvert de la plantation à celles citées par Calder (1986) à propos de plantations d'Eucalyptus se situant à Fiji (valeurs comprises entre 0,8 et 1,4 mm).

2.3. Eléments du bilan : transpiration, T/ETP, évapotranspiration réelle et drainage

La transpiration moyenne saisonnière et moyenne journalière sur les trois années 1996, 1997 et 1998, pour la plantation et pour la savane, est respectivement de 655 et de 478 mm (3,6 et 2,6 mm jour^{-1}) en saison des pluies, et de 168 et 112 mm (1,4 et 0,9 mm jour^{-1}) en saison sèche. Pour de nombreux peuplements d'Eucalyptus, la transpiration moyenne

journalière varie de 3 à 5 mm jour⁻¹ en conditions hydriques non limitantes, avec des maxima journaliers allant jusqu'à 6-8 mm jour⁻¹ selon Dye (1987) et des minima de 1 à 3 mm jour⁻¹ selon Roberts et Rosier (1993).

L'indice foliaire maximal (LAI, Leaf Area Index) obtenu pour notre station d'Eucalyptus est de 3,2. Cette valeur est proche de celles de peuplements comparables. Selon Roberts *et al.* (1992), pour des peuplements indiens âgés de 6 ans, il est de 2,2 pour *Eucalyptus tereticornis* et de 2,3 pour *Eucalyptus camaldulensis* ; selon Gazarini *et al.* (1990), il est de 3,8 pour *Eucalyptus grandis* âgé de 6 ans et situé au Portugal et, selon Beadle *et al.* (1995), de 3 à 4,5 pour *Eucalyptus globulus* âgé de 4 ans et situé en Australie.

La résistance stomatique moyenne du couvert d'Eucalyptus, r_s (moyenne établie de 1996 à 1998) a été calculée en utilisant le modèle de Jarvis (Stewart, 1988). Elle dépend (a) de la résistance stomatique minimale r_{smin} mesurée dans des conditions supposées non limitantes de disponibilité en eau, (b) de l'indice foliaire, (c) du rayonnement net, (d) du déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air, (e) de la différence entre la réserve en eau à la capacité au champ et la réserve en eau du moment $R_{CC}-R$. Pour un indice foliaire de 3,2, la résistance stomatique minimale est de 6,1 m s⁻¹ en saison des pluies et de 16,7 m s⁻¹ en saison sèche. Nos valeurs de résistance stomatique minimale en saison des pluies recourent celles de Beadle *et al.* (1995) : en conditions hydriques non limitantes, la résistance stomatique minimale moyenne d'un couvert d'Eucalyptus (valeurs moyennes annuelles de plusieurs peuplements) est de 5,9 m s⁻¹ pour un indice foliaire de 3,5. La résistance stomatique minimale moyenne de la savane est respectivement de 3,5 m s⁻¹ en saison des pluies et de 5,4 m s⁻¹ en saison sèche pour un indice foliaire compris entre 2,6 en août à 4,1 en février.

La transpiration (T) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) varient dans le temps, et le rapport T/ETP (transpiration relative) varie en fonction de l'état hydrique du sol. La variation de T/ETP en fonction de la réserve en eau du sol, exprimée relativement à la réserve à la capacité au champ (R/R_{CC}), dépend de l'espèce et rend compte de sa régulation stomatique. Pour la plantation (figure 2), le rapport T/ETP diminue suivant une courbe hyperbolique de 1 à 0-0,2, valeur correspondant à une réserve en eau du sol proche du point de flétrissement permanent (53% de R_{CC} , soit 328 mm).

Figure 2 : Relation entre la transpiration relative du peuplement (transpiration/évapotranspiration potentielle, T/ETP) et la réserve en eau du sol (valeurs moyennes mensuelles du 17 février 1997 au 26 juillet 1999 : (a) plantation d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*) ; (b) savane à *Loudetia arundinacea*. Relations between relative transpiration and the reserve of ground water for (a) an eucalyptus plantations and (b) a savannah.

La valeur moyenne de la saison des pluies (0,79, sol bien alimenté en eau, $R \approx R_{CC}$) est proche de celle citée par George (1978) pour des peuplements identiques situés en Inde, âgés de 6 ans et dans des conditions similaires pour lesquels $T/ETP=0,81$ (*Eucalyptus tereticornis*, $P_i=1670 \text{ mm an}^{-1}$). Calder (1986) a étudié des peuplements d'*Eucalyptus saligna* âgés de 6 ans, au Brésil ($P_i=1280 \text{ mm an}^{-1}$) pour lesquels $T/ETP=0,84$. Myers *et al.* (1996) ainsi que Honeysett *et al.* (1996) donnent une valeur T/ETP comprise entre 0,76 et 0,86 pour un peuplement d'Eucalyptus situé en Australie et en Tasmanie ayant un LAI de 2,8 à 3,1 (*Eucalyptus grandis*).

La variation du rapport T/ETP de la savane en fonction de l'état hydrique du sol (figure 2) est différente de celle de la plantation : T/ETP varie de façon linéaire en fonction de R/R_{CC} ; la valeur moyenne de T/ETP est de 0,61 pendant la saison des pluies (R proche de $R_{CC}=363 \text{ mm}$) et de 0,34 pendant la saison sèche (R proche de 51% de R_{CC} , soit 185 mm). Alors que l'on observe pour la plantation des valeurs nulles de T/ETP (pour R proche du R_{PPF}), les valeurs les plus faibles observées pour la savane vont de 0,19 à 0,25. Et quelle que soit la réserve en eau du sol, pour une valeur donnée de cette réserve en eau du sol, la transpiration relative de la plantation est toujours supérieure à celle de la savane. On pourra qualifier le type de régulation stomatique de la plantation comme « peu marqué ».

Lors de la saison des pluies des trois années étudiées, la plantation a évapotranspiré en moyenne 767 mm d'eau, soit une ETR moyenne journalière de $4,2 \text{ mm jour}^{-1}$. Dye (1987) donne une valeur d'ETR de $4,7 \text{ mm jour}^{-1}$, valeur moyenne journalière en saison des pluies, calculée sur 57 jours, pour un peuplement d'*Eucalyptus grandis* situé dans le Transvaal Oriental en Afrique du Sud ($P_i=1250 \text{ mm an}^{-1}$, peuplement âgé de 6 ans, hauteur de 21,9 m, 725 arbres ha^{-1} , LAI=4,23). Pendant les mêmes périodes, la savane a évapotranspiré 579 mm d'eau, soit une moyenne journalière de $3,2 \text{ mm jour}^{-1}$. Lors de la saison sèche, l'ETR moyenne de la plantation et de la savane est respectivement de 183 et 121,5 mm ($1,5$ et 1 mm jour^{-1}).

La validité des mesures d'ETR dépend du choix des stations qui doivent répondre aux exigences de l'application de l'équation de Penman-Monteith : un couvert dense et homogène d'une surface supérieure à $10\,000 \text{ m}^2$. La difficulté réside dans la possibilité de transferts horizontaux d'énergie, ce qu'a observé Sharma (1984) pour des plantations d'*Eucalyptus marginata* et *Eucalyptus calophylla* à l'ouest de l'Australie (avec $P_i=1100 \text{ mm an}^{-1}$), pour lesquelles l'ETR a été supérieure à l'ETP à cause de transferts horizontaux d'énergie. Nous n'avons pas observé ce type de phénomène et enregistrons une très bonne corrélation entre l'ETR mesurée via l'équation de Penman-Monteith, celle obtenue par la méthode du bilan hydrique et celle provenant du rapport de Bowen (Nizinski *et al.* 2002).

L'évolution sur trois ans de la teneur en eau du sol en fonction de la profondeur (profils hydriques du sol) pour la plantation et la savane a permis de délimiter leur zone racinaire : la totalité de l'eau absorbée par ces deux écosystèmes provient des cinq premiers mètres de profondeur pour la plantation et des trois premiers mètres pour la savane. L'analyse des profils hydriques de la plantation rejoint les résultats des mesures de flux de sève effectuées dans la plantation d'Eucalyptus lors de la saison sèche de 1997 : les arbres subissant un stress hydrique important (par exemple $T=0,8 \text{ mm jour}^{-1}$, $ETP=3,1 \text{ mm jour}^{-1}$ et $T/ETP=0,26$) ne prélèvent pas d'eau en deçà de cinq mètres de profondeur. Cette délimitation de la zone racinaire a une importance capitale dans la méthode employée et dans la précision d'appréciation de la quantité d'eau disponible pour chacun des deux écosystèmes.

Dans la savane (tableau 2), il y a **drainage** en dehors de la zone racinaire lors des saisons des pluies 1997-98 et 1998-99. Si on cumule le drainage sur les trois années étudiées (0, 390 et 438 mm), on obtient un total de 827 mm. Dans la plantation (tableau 2), on retrouve les

mêmes variations mais le drainage hors de la zone racinaire est moindre (0, 207 et 263 mm sur les trois années étudiées, soit un cumul de 470 mm). Lors de la saison des pluies 1996-97, il n'y a de drainage ni dans la plantation ni dans la savane ; lors des saisons des pluies 1997-98 et 1998-99, le drainage dans la savane fut supérieur à celui de la plantation de respectivement 183 et 174 mm. Ces valeurs sont proches de celles obtenues en Afrique du Sud par Van Lill *et al.* (1980) pour des bassins versants qui étaient à l'origine couverts de savanes puis furent plantés d'Eucalyptus (zone avec précipitations incidentes annuelles de 1150 mm an⁻¹) : le boisement avec *Eucalyptus grandis* a réduit le ruissellement vers les cours d'eau de 340 mm cumulés sur trois ans ; ce ruissellement provenait du drainage, le boisement ayant donc réduit le drainage hors de la zone racinaire.

2.4. Durabilité des plantations d'Eucalyptus

Chacun des deux écosystèmes ayant une ETR qui lui est propre, pour l'impact des Pi sur le bilan hydrique de ces deux écosystèmes, nous avons conçu la notion d'année déficitaire théorique. Si on compare l'ETR et le drainage de la plantation et de la savane en valeurs cumulées sur les trois années étudiées, l'ETR de la plantation est supérieure de 688 mm à celle de la savane et le drainage de la plantation est inférieur de 306 mm à celui de la savane : les plantations d'Eucalyptus pouvant être considérées comme d'anciennes savanes, le boisement de la savane avec des Eucalyptus augmente l'ETR et réduit le drainage. L'année déficitaire théorique, à savoir une année pour laquelle les précipitations incidentes de l'année (Pi) sont inférieures à l'évapotranspiration réelle moyenne annuelle, sont calculée sur les trois années étudiées (respectivement $ETR_{96-99}=1127$ mm an⁻¹ pour la plantation et $ETR_{96-99}=821$ mm an⁻¹ pour la savane)..

Sur une période de quarante neuf ans (1949-98), le nombre d'années déficitaires théoriques est de dix-sept pour la plantation et de trois (1958, 1978 et 1989) pour la savane. Mais, si on considère maintenant la variable du « nombre d'années déficitaires théoriques successives », ce phénomène a eu lieu une fois pour la plantation pendant quatre années successives (1971 à 1974) mais aucune fois pour la savane.

Lors de la saison des pluies 1996-97, année particulièrement déficitaire ($Pi_{96-97}=459$ mm, soit 44% de Pi_{50-98}) et considérée comme une année déficitaire théorique, la plantation a évapotranspiré 740 mm. Cette hauteur d'eau correspond à la totalité des précipitations incidentes tombées lors de cette saison des pluies ($Pi_{96-97}=459$ mm), à laquelle il faut ajouter 281 mm d'eau qui ont donc été prélevés dans la zone racinaire (de 5 m de profondeur), desséchant ainsi la zone racinaire vers la fin de la saison sèche 1997 (septembre) jusqu'au point de flétrissement permanent (52% de la réserve totale). L'analyse des profils hydriques rend bien compte de ces phénomènes. Dans le même temps, la savane a évapotranspiré 473 mm, ce qui correspond à seulement 14 mm prélevés dans la zone racinaire, à opposer aux 281 mm prélevés dans le cas de la plantation. A la fin de la saison sèche, le sol est au point de flétrissement permanent dans la plantation alors que dans la savane, il subsiste dans le sol une quantité d'eau qui représente 15% de R_{RU} , soit 27 mm (pour une zone racinaire de 3 m de profondeur).

La plantation d'Eucalyptus est un écosystème artificiel qui absorbe/transpire toute l'année et qui consomme toute l'eau disponible. La succession de plusieurs années déficitaires se traduit par l'épuisement de la réserve en eau disponible dans le sol, épuisement dont on peut supposer qu'il entraîne une réduction de la production de bois de la plantation. Dans le cas de la savane, sachant qu'il subsiste 27 mm d'eau dans le sol à la fin de la saison sèche 1996-97, on peut imaginer le scénario d'autres années déficitaires succédant à une année du type 1996-97 : les 27 mm seraient alors utilisés sans incidence sur la production de la savane.

Sachant qu'entre 1950 et 1998, il n'y a eu qu'un seul épisode de quatre années déficitaires successives pour la plantation dans le bassin du Kouilou, et que la durée de rotation d'une plantation est de sept ans, on peut supposer que ce type d'épisode « sec » ne compromet pas la survie des plantations, mais qu'il ne fait que réduire leur production. Dans le cas de la savane, il n'y a pas eu ce type d'épisode « sec » : la savane est l'écosystème naturel adapté au climat du Bas-Congo, caractérisé par une variabilité interannuelle des précipitations incidentes importante ; ces conditions climatiques ont sélectionné un écosystème dont l'ETR est faible, plus faible que l'ETR d'une plantation d'Eucalyptus.

L'aire de distribution naturelle du genre *Eucalyptus* s'étend entre 7° de latitude nord et 43°39' de latitude sud (Sadanandan et Brown, 1997) : on peut classer les *Eucalyptus* en deux grands groupes, l'un « économe en eau » et l'autre « grand consommateur en eau ». Les clones étudiés *Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna* appartiennent au second groupe et proviennent d'un hybride introduit de Java (zone tropicale humide avec des précipitations incidentes moyennes annuelles de 2030 mm an⁻¹), à croissance rapide dont les feuilles ont une durée de vie courte (environ de 6-9 mois) et une régulation stomatique « peu marquée » ($r_{smin}=3,5$ à $5,9$ m s⁻¹ en saison des pluies). La durée de vie des feuilles des *Eucalyptus* de la station est d'environ 6-9 mois (Nizinski *et al.* 2002) et les résistances stomatiques minimales observées situent le peuplement étudié comme appartenant au groupe « grands consommateurs en eau ». Or, le climat du Bas-Congo est caractérisé par une variabilité interannuelle des précipitations incidentes importante (de $Pi_{58}=296,0$ mm an⁻¹ à $Pi_{60}=2045,3$ mm an⁻¹). L'eau est un facteur limitant pour ces deux clones, néanmoins bien acclimatés au climat régional. On peut illustrer cette acclimatation par l'utilisation de l'hydromasse en saison sèche : les forestiers ont suivi l'accroissement de bois dans le massif d'*Eucalyptus* étudié à l'aide de colliers fixés sur les troncs d'arbres à 1,30 mètre du sol de 1992 à 1998, période pendant laquelle il n'y a qu'une année déficitaire (1996-97). Sur cette durée de sept ans, ils n'ont pas observé de diminution significative de la production de bois lors des saisons sèches. Si des capteurs plus fins (capteurs de déplacement) avaient été utilisés, nous aurions peut-être pu observer l'utilisation de l'hydromasse lors de ces saisons sèches (pour un peuplement de 24 m, l'hydromasse est d'environ 20 à 30 mm selon Granier, 1987). Si on « étale » ces 30 mm sur la saison sèche (juillet et d'août), on obtient une valeur de 0,5 mm jour⁻¹ à ajouter au flux de sève (mesuré à 1,30 m du sol) qui s'élève à 0,5 mm jour⁻¹ (valeur moyenne du 24 mai au 1 août 1997). Il est alors possible d'estimer une transpiration journalière d'environ 1 mm jour⁻¹. Pour une ETP proche de 2 mm jour⁻¹ (saison sèche 1997), le rapport T/ETP serait alors de 0,5, situation proche du rapport optimum (T/ETP=0,79) et de la résistance stomatique minimale. L'utilisation de l'hydromasse en saison sèche évite donc ou modère, selon les années, la chute de production en saison sèche.

Conclusion

La succession de plusieurs années déficitaires réduit la production de bois de la plantation, mais ne compromet pas sa survie compte tenu du type de rotation de ces plantations, premier élément positif pour conclure à la durabilité de ces plantations. Le boisement de la savane avec des plantations d'*Eucalyptus* réduit le drainage, la teneur en eau du sol des plantations étant globalement toujours inférieure à celle du sol de la savane. A long terme, cette faible teneur en eau induit-elle une modification des caractéristiques chimiques et biologiques du sol ? Une étude des sols et des bilans carboné et minéral des deux écosystèmes reste à faire pour déterminer ces aspects de la durabilité de ces plantations. Le boisement de la savane avec des plantations d'*Eucalyptus* augmente l'ETR. A long terme, y aura-t-il modification du climat local ou régional ? L'étude est à entreprendre dès maintenant pour déterminer cet autre aspect de la durabilité des plantations.

Les peuplements actuels dans le bassin du Kouilou couvrent 43 000 ha, les prévisions pour 2015 sont de 100 000 ha. Des études simultanées de la croissance et de la transpiration devront permettre de sélectionner les clones favorisant des plantations durables. Sachant que l'eau est un facteur limitant de la production de bois des clones actuels, il faudrait étudier les réponses à l'alimentation en eau des clones choisis pour les futures plantations pour comparer (1) leur vitesse de croissance pour des conditions données d'alimentation en eau, (2) leur efficacité d'utilisation de l'eau, à savoir la quantité de matière sèche produite par unité de volume d'eau consommé, quelle que soit leur vitesse de croissance et, pour finalement sélectionner l'une ou l'autre de ces caractéristiques. Si on suppose qu'une ETR élevée modifiera le climat régional à long terme, les clones à l'origine de plantations durables ne devront pas nécessairement être les plus productifs en bois.

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

Bibliographie

- BEADLE C. L., NEILSON R. E., TALBOT R. E. et JARVIS P. G., 1995 : Stomata conductance and photosynthesis in a mature Scots pine forest. I. Diurnal, seasonal and spatial variation in shoots. *Journal of Applied Ecology*, **22**, 557-571.
- BOUILLET J.-P., LACLAU J.-P., NIZINSKI J. et NZILA J. D., 1999 : La Fertilité des sols sous Eucalyptus : Impact des plantations autour de Pointe Noire (Congo). *Le Flamboyant*, **49** (3), 26-28.
- CALDER I. R., 1986 : Water use of Eucalyptus – a review with special reference to South India. *Agricultural Water Management*, **11**, 333-342.
- DYE P. J., 1987 : Estimating water use by Eucalyptus grandis with the Penman-Monteith equation. *Forest Hydrology and Watershed Management*, **167**, 329-337.
- GAZARINI L. C., ARAUJO M. C. C., BORRAHLO N. et PEREIRA J. S., 1990 : Plant area index in *Eucalyptus globulus* plantations determined indirectly by light interception method. *Tree Physiology*, **7**, 107-113.
- GEORGE M., 1978 : Interception, stemflow and throughfall in a Eucalyptus hybrid plantation. *Indian Forestry*, **104**, 719-726.
- GRANIER A., 1987 : Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap-flow measurements. *Tree Physiology*, **3**, 309-320.
- HONEYSETT J. L., WHITE D. W., WORLEDGE D. et BEADLE C. L., 1996 : Growth and water use of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in irrigated and rainfed plantations. *Australian Forestry*, **59**, 64-73.
- LACLAU J.-P., BOUILLET J.-P. et RANGER J., 2000 : La Fertilité des sols sous Eucalyptus : impact des plantations autour de Pointe-Noire (Congo). *Forest Ecology and Management*, **128**(3), 181-196.
- MYERS B. J., THEIVEYANTHAN S., O'BRIEN N. D. et BOND W. J., 1996 : Growth and water use of effluent-irrigated *Eucalyptus grandis* and *Pinus radiata* plantations. *Tree Physiology*, **16**, 211-219.
- NIZINSKI J.-J., LOUMETO J.-J., AYOMA M.-B., MABIALA-N'GOMA A. et NSEMI R. N., 2002 : Evapotranspiration réelle de la plantation d'Eucalyptus (bassin du Kouilou, Congo). *Annales de l'Université de Marien Ngouabi (Brazzaville)*, **3**, 10-24.

- PENMAN H. L., 1948 : Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proc. R. Soc. London, Ser. A.*, **193**, 120-145.
- PINKER R. T., THOMPSON O. E. et ECK T. F., 1980 : The albedo of tropical evergreen forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **106**, 551-558.
- RIOU C., 1975 : *La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale*. ORSTOM, Paris, 236 pages.
- ROBERTS J. et ROSIER P. T. W., 1993 : Physiological studies in young Eucalyptus stands in southern India and derived estimates of forest transpiration. *Agricultural Water Management*, **24**, 103-118.
- ROBERTS J. M., ROSIER P. T. W. et MURTHY K. V. S., 1992 : *Physiological studies in young Eucalyptus stands in southern India and their use in estimating forest transpiration*. In: Calder I.R., Hall R.L., Adlard P.G. (éditeurs), 'Growth and Water Use of Forest Plantations', Wiley, 226-243.
- SADANANDAN N. E. K. et BROWN A. G., 1997 : *Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests*. ACIAR Monograph n°43, 571 pages.
- SHARMA M. L., 1984 : Evapotranspiration from a Eucalyptus community. *Agricultural Water Management*, **8**, 41-56.
- SMITH M. K., 1974 : Throughfall, stemflow, and interception in pine and eucalypt forest. *Australian Forestry*, **36**, 190-197.
- STEWART J. B., 1988 : Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **43**, 19-37.
- VAN LILL W. S., KRUGER F. J. et VAN WYK D. B., 1980 : The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden and *Pinus patula* Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. *Journal of Hydrology*, **48**, 107-118.
- VENNETIER P., 1968 : *Pointe-Noire et façade maritime du Congo-Brazzaville*. Mémoires ORSTOM n°26, ORSTOM, Paris, 458 pages.
- WORLD COMMISSION ON ENVIRONEMENT AND DEVELOPMENT, 1987 : Our common future. Oxford University Press, 323 pages.