

Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guineensis* Jacq.) exposed to seasonal soil water deficits(1)

Variation de l'évapotranspiration d'un couvert de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) soumis à un déficit hydrique saisonnier du sol (1)

E. DUFRENE⁽²⁾, B. DUBOS⁽³⁾, H. REY⁽⁴⁾, P. QUENCEZ⁽³⁾ AND B. SAUGIER⁽²⁾

Abstract. — Evapotranspiration (E) and interception losses (I_n) from a stand of oil palm trees (*Elaeis guineensis* Jacq.) were measured weekly from 1988 to 1990 using a water balance method. Stomatal conductance, leaf area index and climatological parameters were measured and used to calculate the rate of transpiration (T) from canopy of oil palm stand using the Penman-Monteith equation. At high values of soil water storage in the root zone the evapotranspiration rate of the stand was 81 % of the potential evaporation (E_p , Penman, 1948; modified by Van Bavel, 1966), the ratio of the transpiration rate to the potential evaporation (T/ E_p) varied from 0.69 to 0.72 and the stomatal conductance (g) varied from 6.0 to 6.6 mm s⁻¹. During the 1988 dry season, which was the more pronounced one, E/ E_p and T/ E_p were reduced to respectively 0.56 and 0.35. Net interception during rainy and dry seasons were respectively 11 % and 5 % of the potential evaporation. During the three dry seasons observed, the fraction of extractable water in the rooted zone of the soil (5.2 m deep) remained above 0.4 as a consequence of early stomatal closure which occurred when fractional extractable water of the top 80 cm of soil (f_{80}) decreased below 0.67. When f_{80} decreased below 0.35, E/ E_p decreased sharply to a value of 0.1 corresponding to a stomatal conductance of about 1.5 mm s⁻¹.

Key words. — Interception losses; stomatal, aerodynamic and canopy conductances; soil water balance; extractable soil water content; roots deep.

INTRODUCTION

Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is an important species as a source of oil and lipids, covering some 3 million hectares in the tropical areas and replacing tropical forest at a rate higher than 200 000 ha per year. Soil water deficits, which are commonly observed in West Africa and South

Résumé. — L'évapotranspiration (E) et les pertes par interception nette (I_n) ont été mesurées sur une parcelle de palmiers à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) entre 1988 et 1990 en utilisant une méthode de bilan hydrique appliquée à un rythme hebdomadaire. Des mesures de conductance stomatique, d'indice foliaire et de climatologie ont été utilisées pour calculer la transpiration du couvert de palmiers à l'aide de l'équation de Penman-Monteith. En condition d'alimentation hydrique du sol non limitante, l'évapotranspiration représente 81 % de l'évaporation potentielle (E_p , Penman, 1948; modifié par Van Bavel, 1966), le rapport de la transpiration sur l'évaporation potentielle (T/ E_p) est compris entre 0.69 et 0.72, et la conductance stomatique (g) entre 6.0 et 6.6 mm s⁻¹. Au cours de la foite saison sèche de l'année 1988 les rapports E/ E_p et T/ E_p ont été abaissés respectivement à 0.56 et 0.35. L'interception nette des précipitations représente 11 % de l'évaporation potentielle au cours de la saison des pluies et 5 % durant la saison sèche. Au cours des trois saisons sèches étudiées, la réserve en eau du sol dans la zone racinaire (5.2 m de profondeur) est restée supérieure à 40 % de la réserve utile. Ceci peut être interprété comme une conséquence de la fermeture précoce des stomates quand la réserve en eau dans les 80 premiers centimètres de sol (f_{80}) est inférieure à 67 % de la réserve utile. Lorsque f_{80} est inférieure à 35 % de la réserve utile, E/ E_p décroît rapidement jusqu'à atteindre 0.1 ce qui correspond à une conductance stomatique de 1.5 mm s⁻¹.

Mots clés. — Interception nette des pluies, conductance stomatique, conductance aérodynamique du couvert, bilan d'eau, réserve utile en eau, profondeur de l'enracinement

INTRODUCTION

Le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) est une espèce végétale importante pour la fourniture d'huile et de lipides; il occupe une surface de près de 3 millions d'hectares en zone tropicale et se substitue à la forêt au rythme annuel de plus de 200 000 hectares. Le déficit hydrique du sol, que l'on rencontre fréquemment en Afrique de l'Ouest et en Amérique de

(1) Reprinted from *Acta Oecologica*, 1992, 13 (3), 299-314

(2) Laboratoire d'Ecologie Végétale, Faculté des Sciences, Université Paris XI-Orsay, Bat. 362, 91305 Orsay cedex, France

(3) Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (C.I.R.A.D.), Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux (I.R.H.O.), 11 square Pétrarque, 75116 Paris, France

(4) Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (C.I.R.A.D.), Département du G.E.R.D.A.T., Laboratoire de Modélisation, Parc Euromédecine, Bat. G, 34023 Montpellier, France

(1) Paru dans *Acta Oecologica*, 1992, 13 (3), 299-314

(2) Laboratoire d'Ecologie Végétale, Faculté des Sciences, Université Paris XI-Orsay, Bat. 362, 91305 Orsay cedex, France

(3) Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (C.I.R.A.D.), Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux (I.R.H.O.), 11 square Pétrarque, 75116 Paris, France

(4) Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (C.I.R.A.D.), Département du G.E.R.D.A.T., Laboratoire de Modélisation, Parc Euromédecine, Bat. G, 34023 Montpellier, France

America, have long been recognized as a main limiting factor of oil palm productivity (Devuyst, 1948; Sparnaaij *et al.* 1965). The high yield of oil palm which can reach 8 t of oil ha⁻¹ year⁻¹ and the high maximum stomatal conductance (about 9 mm s⁻¹, Squire, 1985; Dufrière and Saugier submitted⁽¹⁾) would imply a high canopy transpiration rate. However, little is known about evapotranspiration (E) and transpiration (T) in oil palm stands and their dependence on soil water storage. The present work gives an estimation of seasonal changes in interception losses (I_n) and evapotranspiration (E) measured by using a water balance method and canopy transpiration (T) as calculated with the Penman-Monteith equation, using physiological and climatological measurements. All three were compared with potential evaporation (E_p) with the aim of understanding limitations to oil palm productivity with water deficit.

MATERIAL AND METHODS

Site and planting material

The experiments were carried out at the oil palm research station at La Mé (5° 25' N, 3° 50' E) near Abidjan on the Ivory Coast, from December 1987 to June 1990, including three dry seasons. The plot (E70/12) chosen for this study was part of a flat and homogenous fertilizer trial replanting in 1973 (Trial LMCP28: 4.3 ha). The plot area (1680 m²) was enclosed to avoid damages and perturbations. It contained 24 palm trees planted 9 metres apart in an equilateral triangle design at a usual density of 143 palms ha⁻¹.

All the trees studied were the progeny of a single family (L2T × D10D), which is widespread in experimental and commercial plantations.

Soil

The soil is a deep ferrallitic sandy soil, typical of tertiary sediments found in Ivory Coast (Ochs, 1977; Olivin and Ochs, 1978). Table I shows its physical and hydrological characteristics. The whole profile remains highly sandy: the granulometric fraction, ranging between 0.2 mm and 2.0 mm, is largely dominant from 67 % at the top soil to 46 % at 510 cm depth. Volumetric soil water content at field capacity (θ_{FC}, cm³ cm⁻³) was measured in the field at 10-cm intervals. 105 hours after a heavy rainfall occurred during the main rainy season (133.5 mm on the 10/07/1988). θ was measured continuously after the end of the rainfall. After 105 hours an important reduction into drainage occurred (Fig. 1). Volumetric soil water content at the wilting point (θ_{WP}, cm³ cm⁻³) was measured in the laboratory using a pressure-membrane method.

The different parameters of the soil showed only small variations with depth without clear discontinuity and consequently it was not possible to identify discrete layers in this homogenous soil profile.

Local climate

The tropical climate of the forested area on the Ivory Coast is characterized by a long dry season from December to April and a long rainy season generally interrupted by a short dry period in August. Annual rainfall, lysimetric evapotranspi-

Sud a été identifié depuis longtemps comme le principal facteur limitant de la production en huile du palmier (Devuyst, 1948 : Sparnaaij et al., 1965). Les hauts rendements en huile, observés jusqu'à 8 t ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que des conductances stomatiques maximales élevées (environ 9 mm s⁻¹, Squire, 1985 ; Dufrière et Saugier, sous presse⁽¹⁾) laissent supposer une transpiration élevée du couvert. Peu d'études ont cependant été menées sur l'évapotranspiration (E) et la transpiration (T) de couverts de palmiers à huile et sur leurs relations avec le bilan hydrique du sol. Cet article présente des estimations des variations saisonnières de l'interception nette des pluies (I_n) et de l'évapotranspiration (E), mesurées à partir du bilan hydrique du sol, d'une part, et de la transpiration du couvert (T) calculée par application de l'équation de Penman-Monteith en utilisant les observations physiologiques et climatiques, d'autre part. Les trois variables (I_n), (E) et (T) sont comparées à l'évaporation potentielle (E_p) pour expliciter l'effet dépressif du déficit hydrique sur la productivité du palmier à huile.

MATERIEL ET METHODE

Site d'étude et matériel végétal

L'expérimentation a été conduite sur la station de La Mé (5°25' N, 3°50' E) près d'Abidjan en Côte-d'Ivoire, sur la période décembre 1987 à juin 1990, incluant trois saisons sèches. La population d'arbres choisie est constituée par une sous parcelle (E 70/12) d'un essai de nutrition minérale (LMCP28 - 4,3 ha replantation 1973), particulièrement plat et homogène. La sous parcelle retenue (1680 m²) a été isolée par une clôture. Elle comporte 24 arbres plantés en triangles équilatéraux de 9 m de côté, soit une densité de 143 arbres ha⁻¹ classiquement utilisée.

Tous les arbres sont des reproductions de L2T×D10D, descendance particulièrement connue et utilisée en expérimentation et en plantations commerciales.

Soil

Il s'agit d'un sol sableux, ferrallitique profond, caractéristique des sédiments tertiaires de Côte-d'Ivoire (Ochs 1977, Olivin et Ochs 1978). Ses caractéristiques physiques et hydrologiques sont présentées dans le tableau I. L'ensemble du profil, très sableux, est largement dominé par la fraction granulométrique comprise entre 0,2mm et 2mm - 67% en surface, 46% à 510 cm de profondeur. L'humidité volumique à la capacité au champ (θ_{CC} cm³ cm⁻³) a été mesurée in situ, au pas de 10 cm, après un ressuyage de 105 heures à la suite d'une forte précipitation en pleine saison des pluies (133,5mm le 10/07/88). L'humidité a été mesurée en continu dès la fin de la pluie, ce qui a permis de mettre en évidence une forte réduction du drainage après 105 heures (Fig.1). L'humidité volumique au point de flétrissement (θ_{PF}, cm³ cm⁻³) a été mesurée au laboratoire en utilisant une presse à membrane.

Les paramètres du sol observés n'ont pas fait apparaître de variations suffisamment importantes pour identifier des discontinuités ou des horizons sur le profil considéré comme homogène.

Climat

Le climat tropical de la zone forestière de Côte-d'Ivoire est caractérisé par une longue saison sèche de décembre à avril et une longue saison des pluies, souvent interrompue par une courte période sèche en août. La pluviométrie annuelle, l'évapotranspiration mesurée sur case lysimétrique

(1) Gas exchange of oil palm in relation to light, vapour pressure deficit, temperature and leaf age. *Functional Ecology*, 1993 (7), (in press)

(1) Gas exchange of oil palm in relation to light, vapour pressure deficit, temperature and leaf age. *Functional Ecology* 1993 (7), (in press)

ration (2 m² case planted with *Paspalum sp*) and annual incoming shortwave radiation (S) were respectively 1415 mm, 1086 mm and 4850 MJ m⁻² year⁻¹ (averaged on 1981-1990 period). Mean daily temperature shows very little change with seasons and years, its yearly average was 26.3 °C. Annual E_p (calculated with the Penman combination equation, 1948) was 1351 mm (Monteny, 1987).

(surface de 2m² plantée de *Paspalum sp.*) et le rayonnement global incident (S) atteignent respectivement 1415 mm, 1086 mm et 4850 MJ m⁻² an⁻¹ (moyenne sur la période 1981 - 1990). La température diurne moyenne présente peu de variations saisonnières ou annuelles (26,3 °C en moyenne sur l'année). L'évaporation potentielle E_p (calculée à partir de l'équation de Penman, 1948) est de 1351mm (Monteny, 1987).

TABLE I. — Physical and hydrological characteristics of the soil : depth (H), bulk density (d_α), clay percentage, volumetric soil water contents at field capacity (θ_{FC}) and at the wilting point (θ_{WP}) and maximum water storage in the root zone (V_{FC-V_{WP}}) — (Caractéristiques physiques et hydrologiques des sols profondeur (H), densité apparente (d_α), teneur en argile, humidité volumique à la capacité au champ (θ_{CC}) et capacité de rétention en eau maximale (V_{CC-V_{PF}}), dans l'horizon occupé par les racines)

H	d _α	Clay (Argile)	θ _{FC} (θ _{CC})	θ _{WP} (θ _{PF})	V _{FC-V_{WP}} (V _{CC-V_{PF}})
cm	g cm ⁻³	%	cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	mm
0-20	1.60	7.4	13.0	5.9	14.2
20-40	1.59	9.7	15.7	6.2	19.0
40-60	1.64	12.3	18.3	7.9	20.8
60-80	1.67	18.4	21.2	12.2	18.0
80-100	1.57	17.7	21.6	10.2	22.8
100-130	1.56	18.1	20.2	10.9	27.9
130-160	1.59	17.0	18.5	10.0	25.5
160-210	1.62	20.5	19.5	12.2	36.5
210-260	1.59	25.6	24.2	15.9	41.5
260-310	1.58	33.5	27.8	19.6	41.0
310-360	1.60	29.6	28.6	17.3	56.5
360-410	1.66	29.8	27.0	18.3	43.5
410-460	1.69	29.8	26.5	19.1	37.0
460-520	1.71	34.9	26.3	20.9	32.4
Total					436.6

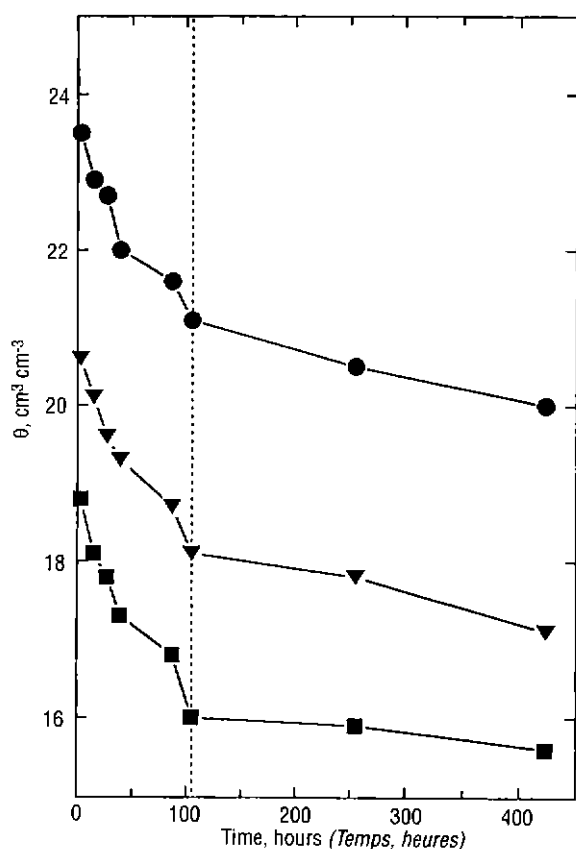


FIG. 1. — Variations in volumetric soil water content (θ, cm³ cm⁻³) with time (t, hours) observed after a long rainy period (629 mm between 01/05/88 and 09/07/88) and a high daily rainfall (133.5 mm on the 10/07/1988). The end of the rainfall was chosen as t = 0 (11/07/1988 at 4:00 GMT). θ measured 105 hours after t = 0 was retained as the field capacity. Three depths were showed: (■) 35 cm, (▼) 155 cm, (●) 205 cm — (Evolution de l'humidité volumique (θ, cm³ cm⁻³) au cours du temps -t, heures-, observée à l'issue d'une longue période pluvieuse -629mm entre le 01/05/88 et le 09/07/88- et après une importante précipitation -133.5 mm le 10/07/88. La fin de la pluie a été choisie comme origine -t=0 le 11/07/88 à 4h00. L'humidité volumique θ mesurée après 105 heures de ressuyage a été retenue comme égale à la capacité au champ. Trois profondeurs sont représentées (■) 35 cm, (▼) 155 cm, (●) 205 cm)

METHOD

Climatological measurements

Photosynthetically active radiation (PAR quantum sensor⁽³⁾) and wind speed (Anemometer, model APM33⁽²⁾) were measured at 10-second intervals and averaged to hourly values. Air temperature (T_a) and water vapour pressure deficit (VPD) were measured hourly using a ventilated psychrometer (model WVU⁽³⁾). All the sensors were mounted on a platform at the top of a permanent pole (15 m above the soil and 3 m above the canopy) and data were recorded at soil level with an automatic data acquisition system (model CR21X⁽⁴⁾). Incident rainfall and throughfall were measured daily on the study plot using one gauge above the canopy (at 15 m height) and 12 gauges at ground level.

Climatological parameters (shortwave radiation, S ; air temperature, T_a ; water vapour pressure deficit, δe ; Piche evaporation, E_{pi}) were measured routinely at the meteorological station of the plantation located 2 km away from the studied plot. Wind speed was not available.

Daily values for oil palm E_p were calculated using the Penman's combination equation (Penman, 1948) modified by Van Bavel (1966) :

$$E_{pr} = \Delta R_n / [\lambda (\Delta + \gamma)] \quad (1)$$

$$E_{pc} = (pcp \delta e g_a) / [\lambda (\Delta + \gamma)] \quad (2)$$

$$\text{with } E_p = E_{pr} + E_{pc}$$

where E_{pr} is the radiative term of the Penman equation which represents the steady state, asymptotic limit approached by a closed atmosphere over a large expanse of vegetation with fixed surface resistance (McNaughton and Jarvis, 1983), E_{pc} is the convective term of the Penman equation modified by Van Bavel (1966); Δ is the slope of the saturation vapour pressure vs. temperature curve (Pa K^{-1}); λ is the latent heat of vapourization of water (J kg^{-1}); γ is the psychrometric constant (Pa K^{-1}); pcp is the heat capacity of air at constant pressure ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$); δe is the saturation pressure deficit of air (Pa) measured at the top of the oil palm canopy.

Net radiation (R_n) was calculated using the following equations established for oil palm canopy in Ivory Coast :

$$R_n = 0.71 S - 0.95 (\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}), \text{ (Monteny, 1987)}$$

$$S = 2.10 Q_{PAR} (\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}),$$

$$(r^2 = 0.97; \text{degree of freedom: d.f.} = 31)$$

where Q_{PAR} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) is the photosynthetic photon flux density within the 400-700 nm band measured at the top of the oil palm canopy.

g_a is the aerodynamic conductance calculated using equation given by Monteith (1965):

$$g_a = (k^2 u) / \ln^2 [(z - d)/z_0] (\text{m s}^{-1})$$

where k is the von Karman constant (0.40); u is the wind speed (m s^{-1} , measured above the oil palm canopy); z is the height above ground (m); z_0 is the roughness height (m); d is the zero plane displacement height (m). In the absence of wind profile data, d and z_0 , the surface roughness parameters, were estimated according to an empirical formula

METHODE

Mesure des paramètres climatiques

Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR quantum sensor⁽³⁾) et la vitesse du vent (Anémomètre, modèle APM33⁽²⁾) ont été mesurés à un pas de temps de 10 secondes pour établir les moyennes horaires. La température de l'air (T_a) et le déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air (VPD) ont été mesurés chaque heure au moyen d'un psychromètre ventilé (modèle WVU⁽³⁾). Tous les capteurs ont été montés sur une plate-forme à l'extrémité d'un mât fixe (à 15 m au dessus du sol, soit 3 m au dessus du couvert) et les données étaient enregistrées au moyen d'une centrale d'acquisition (modèle CR21X⁽⁴⁾) située au sol. Les pluies incidentes et transmises sous le couvert ont été mesurées quotidiennement, sur le site, au moyen d'un pluviomètre fixé en haut du mât et de 12 pluviomètres disposés sur le sol.

D'autres observations climatiques (rayonnement global incident, S , température de l'air, T_a ; déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air, δe ; évaporation Piche, E_{pi}) ont été recueillies quotidiennement sur la station météorologique de la plantation à 2 km de distance de l'essai, à l'exception de la vitesse du vent.

Les valeurs moyennes de E_p pour le palmier à huile ont été calculées à partir de l'équation de Penman (Penman 1948) modifiée par van Bavel (1966) :

$$E_{pr} = \Delta R_n / [\lambda (\Delta + \gamma)] \quad (1)$$

$$E_{pc} = (pcp \delta e g_a) / [\lambda (\Delta + \gamma)] \quad (2)$$

$$\text{avec } E_p = E_{pr} + E_{pc}$$

où : E_{pr} est le terme radiatif de l'équation de Penman qui représente le régime permanent, ou limite asymptotique assimilée à une atmosphère fermée au-dessus d'un vaste couvert végétal dont la résistance de surface serait constante (Mc Naughton et Jarvis, 1983), E_{pc} est le terme convectif de l'équation de Penman modifiée par van Bavel (1966); Δ (Pa K^{-1}) est la pente de la courbe donnant la pression de vapeur saturante de l'air en fonction de la température, λ (J kg^{-1}) est la chaleur latente de vaporisation de l'eau; γ (Pa K^{-1}) est la constante psychrométrique; pcp ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$) est la chaleur volumique spécifique de l'air à pression constante; et δe (Pa) est le déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air mesuré au sommet du couvert des palmiers.

Le rayonnement net (R_n) a été calculé à partir des équations suivantes établies sur plantation de palmier à huile en Côte-d'Ivoire :

$$R_n = 0.71 S - 0.95 (\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}), \text{ (Monteny, 1987)}$$

$$S = 2.10 Q_{PAR} (\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}),$$

$$(r = 0.97, \text{degré de liberté} = \text{ddl} = 31)$$

où : Q_{PAR} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) est la densité du flux de photon photosynthétiquement actif dans la bande des 400-700 nm, mesurée au sommet du couvert.

g_a est la conductance aérodynamique calculée à partir de l'équation proposée par Monteith (1965)

$$g_a = (k^2 u) / \ln^2 [(z - d)/z_0] (\text{m s}^{-1})$$

où : k est la constante de von Karman (0,40); u est la vitesse du vent (m s^{-1}) mesurée au-dessus du couvert; z est la hauteur au-dessus du sol; z_0 est la hauteur de rugosité du couvert (m), d est la hauteur de déplacement du point 0 (m). En l'absence de données sur le profil du vent, les paramètres de rugosité de la surface, d et z_0 , ont été estimés en utilisant les formules empiriques des paramètres en fonction de la

(3) Delta-T Devices Co Cambridge CB5 OEJ, England

(2) Précis Mécanique, 95870 Bezons, France.

(4) Campbell Sci. Co Loughborough LE12 5RA, England

(3) Delta-T Devices Co Cambridge CB5 OEJ, England

(2) Précis Mécanique, 95870 Bezons, France

(4) Campbell Sci Co Loughborough LE12 5RA, England

which relates both parameters to mean tree height (Monteith and Unsworth, 1990) :

$$d = 0.65h \text{ (m)}$$

$$z_0 = 0.10h \text{ (m)}$$

where h = mean tree height (m).

Data from the automatic weather station (oil palm stand) were available for only 382 days during the study period (1190 days). E_{pr} and E_{pc} were calculated using meteorological data from those 382-days and equations (1) and (2). Two linear relations were established between E_{pr} (mm d^{-1}) and S , and between E_{pc} (mm d^{-1}) and Piche evaporation E_{pi} (mm d^{-1}) :

$$E_{pr} = 0.202 \times S \text{ (} r^2 = 0.83, \text{ d.f.} = 381 \text{)} \quad (3)$$

$$E_{pc} = 0.228 \times E_{pi} \text{ (} r^2 = 0.66, \text{ d.f.} = 381 \text{)} \quad (4)$$

$$E_p = E_{pr} + E_{pc} \quad (5)$$

where S = shortwave radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) measured with a Gun-Bellani radiometer at the plantation meteorological station located 2 km away from the study site.

E_{pr} , E_{pc} and E_p were recalculated for the whole study period using equation (3), (4) and (5), and those recalculated values are presented in this work.

Soil water measurements

Volumetric soil water content was measured nearly weekly at 10-cm intervals using a neutron meter probe⁽⁵⁾. Fourteen aluminium access tubes were installed with respect to the planting design, 12 were 2.3-m deep (s) and 2 were 5.2-m deep (l). The 12 short tubes were installed at different distances from different stems at random pattern. Averaged soil water storage were calculated on 2.3-m deep ($V_{2.3}$) for the fourteen tubes. A comparison between long and short tubes showed that the two long tubes are well representative of the 12 shortest ($V_{2.3}(s) = 0.951 \times V_{2.3}(l)$; $r^2 = 0.97$, d.f. = 81). Consequently the two longest tubes were assumed to be representative of the plot on a 5.2-m deep basis. As the root system was 4.8-m deep (Fig. 2) and soil water profiles showed variations in water content at mean up to 5-m deep (Fig. 3), the soil water balance was calculated using the averaged values for the two longest tubes.

A field calibration method was used. Four soil samples were taken at each calibration date and near each of the access tubes, at 10-cm intervals (one calibration occurred during dry season and one at field capacity). Bulk density samples were taken with a cylinder on a 6-m deep pit, dugged close to the plot.

Fractional extractable water (f_z) between the top soil and z -cm deep was defined as follows:

$$f_z = (V - V_{WP}) / (V_{FC} - V_{WP})$$

where V is the water storage, V_{WP} is the water storage at the wilting point and V_{FC} is the water storage at the field capacity. Maximum water storage in the root zone ($V_{FC} - V_{WP}$) was 436.6 mm (Table I).

Plant measurements

At the start of the measurements, the height of the stand was about 12 metres with a growth rate of 45 cm per year.

One leaflet on ten was sampled on the middle whorl leaf (i.e. 17th leaf) of each tree (24), the width of every leaflet was measured each ten centimeters and the leaf area was cal-

hauteur moyenne des arbres h (m) (Monteith and Unsworth, 1990) :

$$d = 0.65h \text{ (m)}$$

$$z_0 = 0.10 h \text{ (m)}$$

Les données de la centrale d'acquisition n'ont été disponibles que pour 382 jours sur toute la période d'observation (1190 jours). E_{pr} et E_{pc} ont été calculées à partir de ces données et des équations (1) et (2). Deux relations linéaires ont pu être établies entre E_{pr} (mm j^{-1}) et S d'une part, et entre E_{pc} (mm j^{-1}) et l'évaporation Piche E_{pi} (mm j^{-1}) :

$$E_{pr} = 0.202 S \text{ (} r = 0.83, \text{ ddl} = 381 \text{)} \quad (3)$$

$$E_{pc} = 0.228 \times E_{pi} \text{ (} r = 0.66, \text{ ddl} = 381 \text{)} \quad (4)$$

$$\text{avec } E_p = E_{pr} + E_{pc} \quad (5)$$

où S ($\text{MJm}^{-2}\text{j}^{-1}$) représente le rayonnement global mesuré avec un actinomètre Gun-Bellani sur la station météorologique de la plantation, situé à 2 km du site d'étude.

E_{pr} , E_{pc} et E_p ont été recalculés pour l'ensemble de la période en utilisant les équations (3), (4) et (5). Ces résultats seront discutés plus loin.

Bilan hydrique du sol

L'humidité volumique a été quantifiée, chaque semaine, par tranches de 10 cm de sol, au moyen d'un humidimètre neutronique⁽⁵⁾. Quatorze tubes d'accès en aluminium dont 12 courts (c, profondeur : 2.3m) et 2 longs (l, profondeur : 5.2m) ont été répartis à différentes distances des palmiers suivant le dispositif de plantation. Le calcul du stock d'eau sur 2.3m de profondeur ($V_{2.3}$) a permis de comparer les résultats obtenus pour les tubes courts et les tubes longs ($V_{2.3}(c) = 0.951 \times V_{2.3}(l)$, $r = 0.97$, $\text{ddl} = 81$). Après avoir constaté la présence de racines jusqu'à 4.8m de profondeur (Fig. 2) et de variations de stock d'eau au-delà de 5m (Fig. 3), les deux tubes longs ont été retenus pour le calcul du bilan d'eau sur 5.2m de profondeur.

Un étalonnage au champ a été établi en prélevant 4 profils de sol (au pas de 10 cm) à proximité immédiate de chaque tube, à deux dates différentes : l'une en saison sèche, l'autre en saison des pluies à la capacité au champ. Les densités apparentes ont été réalisées par la méthode du cylindre, sur une fosse de 6m de profondeur à proximité immédiate du site.

La fraction d'eau disponible (f_z) de la surface du sol jusqu'à la profondeur z est définie de la façon suivante :

$$f_z = (V - V_{PF}) / (V_{CC} - V_{PF})$$

où V , V_{PF} et V_{CC} sont les stocks d'eau respectivement, à la date de mesure, au point de flétrissement et à la capacité au champ.

Le stock d'eau maximum ($V_{CC} - V_{PF}$) sur 520 cm a été évalué à 436.6 mm (Tabl. I).

Mesures sur les palmiers

Au début des observations, la hauteur des arbres atteignait environ 12m, avec une croissance annuelle de 45cm.

Sur chacun des 24 arbres, la surface foliaire de la palme n°17 a été calculée par échantillonnage d'une foliole sur dix sur laquelle la largeur a été mesurée chaque 10cm. L'évolution des surfaces foliaires ont été extrapolées à partir des deux mesures réalisées en juin 1986 et octobre 1987, en considérant que l'accroissement restait linéaire sur la période étudiée. L'indice foliaire (L) a été calculé en fonction du nombre moyen de palmes par arbre (contrôlé deux fois

(5) Model Solo 40, Nardeux S A , 35772 Saint Avertin, France

(5) Modèle Solo 40, Nardeux S A , 35772 Saint Avertin, France

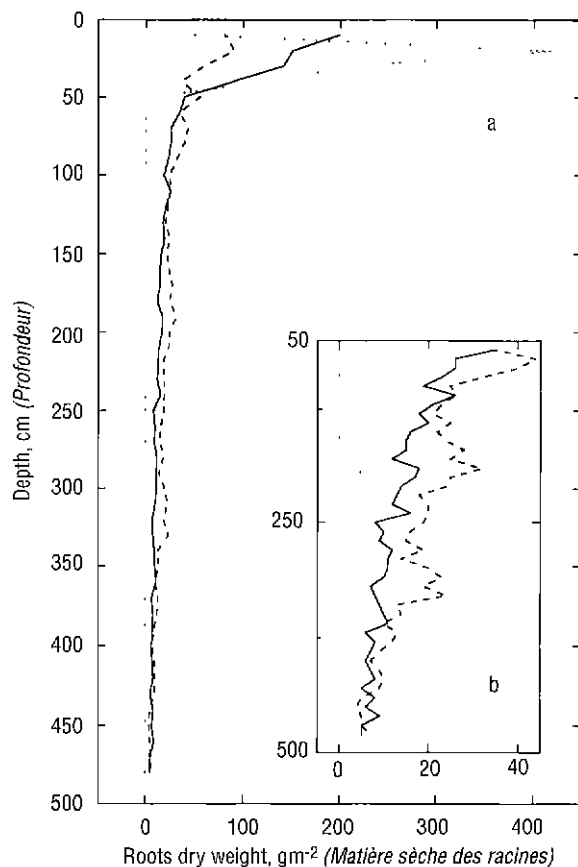


FIG. 2. — Root profile observed on a 6-m depth (a) pit using 4 dm³ cubic metallic boxes, (. . .) Primary, (- - -) Secondary and (—) Fine roots (b) A detailed root profile (from 50-cm depth to 500-cm depth). — (Profil racinaire sur une profondeur de 6m (a) Prélèvement au moyen d'un oroir de 4dm³ (. . .) racines primaires, (- - -) racines secondaires, (—) racines fines (b) profil racinaire détaillé - de 50cm à 500 cm de profondeur)

culated. Changes in leaf area with time was extrapolated from measurements at two times (June 1986 and October 1987), assuming a linear growth rate in leaf area on the whole studied period. Leaf area index (L) was calculated as the number of green leaves (numbered twice a week) times the average leaf area times the planting density. Leaf area index showed high seasonal variations (ranging between a minimum of 4.0 in April 1988 and a maximum of 5.6 in November 1989) related to the rainfall pattern (leaf unfolding was reduced during dry season) and to the harvest intensity (which required to cut some old leaves). The leaves were above 7 m long and the distance between stems was 9 m. As light (400-700 nm) penetration through the canopy was below 15 % and showed no change with distance to the stem (Dufrêne *et al.*, in press⁽⁶⁾), we can conclude that the gaps were small and distributed randomly.

A dynamic diffusion porometer⁽⁷⁾ was used to measure the stomatal conductance on the lower surface (upper surface has no stomates) in two leaflets from the central part of the leaf. During the first year (1988), daily observations were made on nine leaves of one tree, i.e. on three levels of the canopy and on three directions for each level (Table II). In oil palm tree the position (relative height) of one leaf in the canopy decreases with its age (new leaves grow from only one apical meristem). The stomatal conductance measured on the intermediate level (g_2) was in good agreement with the stomatal conductance averaged on the whole canopy

par semaine), de la surface foliaire moyenne et de la densité de plantation. L'indice foliaire montre de fortes variations saisonnières (de 4.0 en avril 1988 à 5.6 en novembre 1989), liées à la distribution de la pluviométrie (avec la réduction du déploiement des palmes en saison sèche) et à l'intensité de la récolte (coupe des feuilles âgées). La longueur des palmes a pu atteindre plus de 7m pour une distance de 9m entre les arbres. Le rayonnement (400-700nm) transmis sous le couvert est resté inférieur à 15% du rayonnement incident. Il présente une distribution homogène en fonction de l'éloignement des stipes, (Dufrêne *et al.*, à paraître⁽⁶⁾), on en déduit que les trouées dans le couvert étaient de surface réduite et distribuées au hasard.

Un poromètre à diffusion dynamique⁽⁷⁾ a été utilisé pour mesurer les conductances stomatiques sur la face inférieure (la face supérieure n'ayant pas de stomate), de deux folioles prélevées dans la partie médiane de la palme. Au cours de la première année, en 1988, des mesures sur un arbre par jour ont été faites sur neuf palmes de cet arbre (soit sur trois palmes de rang différent choisies sur trois spires orientées dans trois secteurs différents) (Tabl. II). Chez le palmier, la hauteur relative d'une palme dans la couronne décroît avec son âge, les nouvelles feuilles étant émises à partir d'un unique méristème apical. La conductance stomatique observée dans la strate intermédiaire (g_2) s'est révélée être une bonne estimation de la conductance moyenne calculée sur toute la couronne ($g=0.98 \times g_2$, $r=0.92$ ddl=282). En considérant que les variations horizontales entre palmes d'une même strate restent faibles (Tabl. II) et que la conductance

(6) Dufrêne E., Quencez P. and Saugier B., Light extinction in oil palm canopies: spatial, seasonal and family variations. Submitted in Agricultural and Forest Meteorology

(7) Models MKII and MKIII, Delta-T Devices Co.

(6) Dufrêne E., Quencez P. and Saugier B., Light extinction in oil palm canopies: spatial, seasonal and family variations. Submitted in Agricultural and Forest Meteorology

(7) Models MKII and MKIII, Delta-T Devices Co.

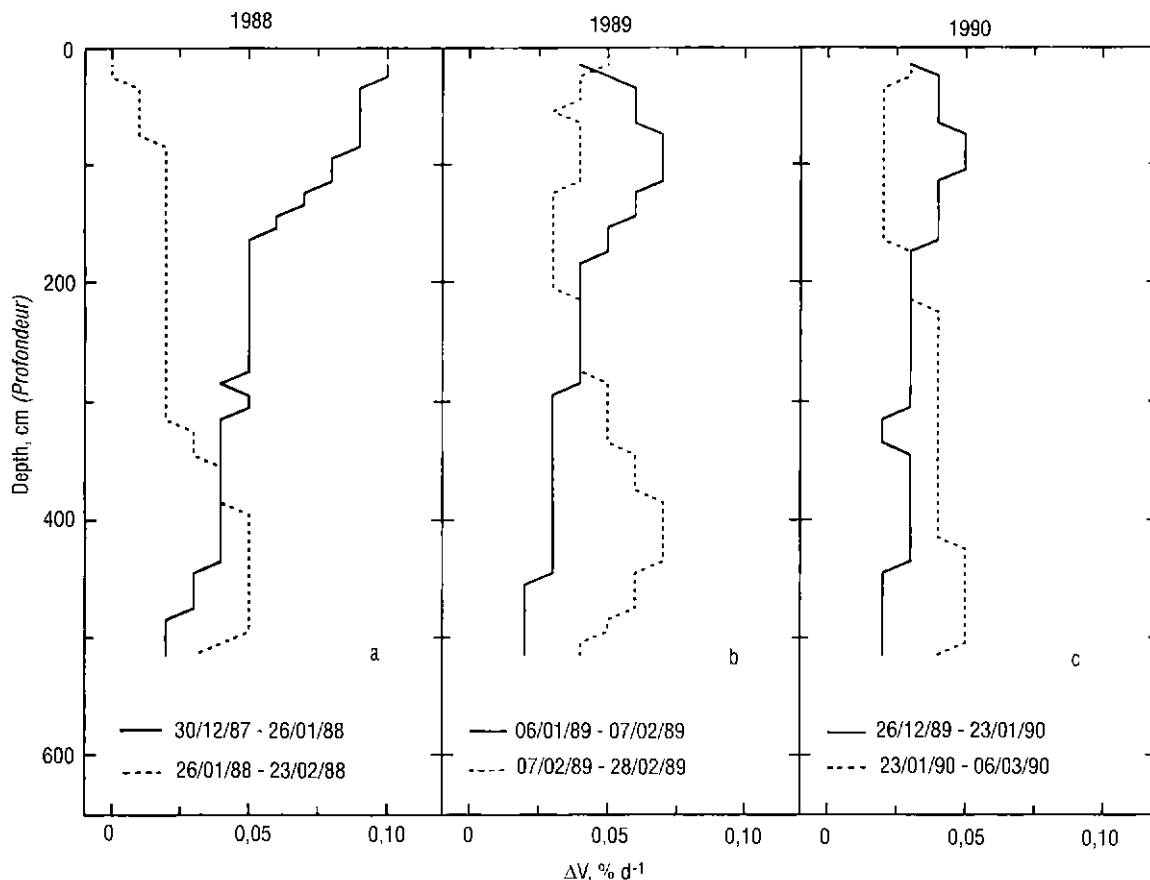


FIG. 3. — Changes in soil water storage (% d⁻¹, in a volume basis) during January and February for three different years a) 1988, b) 1989 and c) 1990 — (Prélèvement d'eau dans le sol (%j⁻¹, sur une base volumique) au cours des mois de janvier et février des 3 années étudiées a) 1988, b) 1989, c) 1990)

TABLE II. — Stomatal conductances were measured one day per week, at least five times a day, on the lower surface in two leaflets from the central part of the leaf and averaged daily (g). Observations were made on three layers (j) of the canopy and on three leaves for each layer. The leaf area was measured on 17th leaf for each tree and assumed to be the same for all the leaves, green leaves were numbered twice a week. Leaf area index of the layer j (L_j) was calculated as the number of green leaves for this layer (N_j) times the leaf area times the planting density. — (Les conductances stomatiques ont été mesurées au moins 5 fois, au cours d'une journée par semaine, sur la surface inférieure de 2 folioles de la partie médiane de la feuille. Les observations ont été conduites sur 3 strates (j) du couvert en utilisant 3 palmes par strate. La surface foliaire a été mesurée sur la feuille de rang 17 de chaque arbre ; elle est supposée constante pour toutes les palmes. Les feuilles fonctionnelles ont été dénombrées deux fois par semaine. L'indice foliaire d'une strate j (L_j) a été calculée à partir du produit, du nombre de feuilles fonctionnelles de la strate (N_j) par la surface foliaire et par la densité de plantation)

Layer (Strate) (j)	Leaf (Feuille) rank (rang)	g_j mm s ⁻¹	N _j	L _j	$\sum_j (g_j L_j)$ mm s ⁻¹	$\sum_j g_j \sum_j L_j$ mm s ⁻¹	$g_2 \sum_j L_j$ mm s ⁻¹
1	8,9,10	6.4 (0.6)(1)	12	1.6 (0.0)	10.4 (1.0)	—	—
2	16,17,18	5.4 (0.5)	10	1.3 (0.0)	7.3 (0.7)	—	—
3	24,25,26	4.1 (0.4)	$\sum_j N_j - 22$	1.8 (0.1)	7.7 (0.9)	—	—
Average / Total (Moyenne / Total)		5.3 (0.5)	$\sum_j LN_j$	4.8 (0.1)	25.4 (2.5)	25.8 (2.6)	26.2 (2.7)

(1) Confidence interval (Intervalle de confiance) (p < 0.05)

(g₂ $\sum_j L_j$) = 1.03 [$\sum_j (g_j L_j)$], calculated daily (calculé sur les données journalières) (r² = 0.94 D.F. = 65)

($g = 0.98 \times g_2$, $r^2 = 0.92$ d.f. = 282). Considering the low horizontal variations between leaves (Table II) and the linear vertical decrease in stomatal conductance, an average on the whole canopy (g) was used to calculate the canopy conductance (g_c , Table II) (Katerji *et al.*, 1983).

After March 1989 observations were made only at the intermediate level but on four different trees. Measurements were made at least five times a day (between 09:00 and 16:00 GMT) and averaged daily. Soil water measurements occurred on the same day of the week as the conductance measurements.

When there is no rain or dew on the vegetation, daily canopy transpiration (T) was calculated using the Penman-Monteith combination equation (Penman 1948, Monteith 1965):

$$T = (\Delta R_n + \rho c_p \delta e g_a) / \lambda [\Delta + \gamma(1 + g_a/g_c)] \quad (6)$$

where g_a (mm s^{-1}) is the aerodynamic conductance and g_c (mm s^{-1}) is the canopy conductance which was calculated using the equation given by Ripley and Saugier (1978):

$$g_c = g L \text{ (mm s}^{-1}\text{)}$$

where g (mm s^{-1}) is the canopy-averaged daily stomatal conductance and L is the leaf area index.

Above a rough surface such as a forest or an oil palm plantation, the ratio g_a/g_c is large which makes the Penman-Monteith's formula (6) very insensitive to variations in g_a . Thus a decrease of 50 % in g_a that could be caused by instability effects results only in a 2 % decrease in the transpiration rate T . Shortwave radiation transmitted through oil palm canopy was below 20 % of the net solar radiation (R_n) (Dufrêne *et al.*, in press) and consequently the maximum soil heat flux can not exceed 20 % of R_n even with a very dry soil. A decrease of 20 % in R_n caused by the soil heat flux would result only in a 6 % decrease in the transpiration rate T .

Three root profiles were observed on a 6 meters deep pit dugged in the same trial 20 m away from the plot studied. Cubic metallic boxes (volume: 4 dm^3) were used for sampling roots and soil.

Water balance method

Average values of the evapotranspiration rate (E), which is the sum of oil palm transpiration (T) and soil evaporation, were calculated at weekly intervals during dry seasons. Calculations were made using the following water balance equation:

$$E = P - I_n - \Delta V / \Delta t - D - R$$

where ΔV (mm) is the change in root zone water storage over the time interval Δt , I_n (mm d^{-1}) is the net amount of rainfall intercepted by the canopy and reevaporated. P (mm d^{-1}) is the incoming rainfall rate over the time interval and D is the average rate of drainage from the root zone over the time interval. D was not measured directly and was assumed to be zero excepted during June and November each year. R is the surface runoff which was not observed and was assumed to be zero during dry seasons considering the very flat surface of the plot and the high leaf area index (Roose, 1981). In this equation the capillary flow from deeper layers was assumed to be zero. I_n was calculated using the following equation:

$$I_n = P - P_s - S_f$$

where P_s (mm) is the throughfall taken as the mean of the 12 rain-gauges beneath the canopy and S_f (mm) is the flow

décroit linéairement en fonction de la hauteur des palmes dans la couronne, la valeur moyenne calculée sur la couronne (g) a été utilisée pour calculer la conductance du couvert (g_c , Tabl II) (Katerji *et al.*, 1983).

Après mars 1989, les observations n'ont été poursuivies que sur la strate intermédiaire (g_2) mais en utilisant quatre arbres différents. La moyenne quotidienne a été établie à partir d'au moins cinq séries de mesures réparties entre 9h et 16h. Ces observations ont été réalisées une fois par semaine en même temps que les profils hydriques du sol.

En l'absence de pluie ou de rosée, la transpiration quotidienne du couvert (T) a été évaluée à partir des équations de Penman-Monteith combinées (Penman, 1948 ; Monteith, 1965) :

$$T = (\Delta R_n + \rho c_p \delta e g_a) / [\Delta + \gamma(1 + g_a/g_c)] \quad (6)$$

où g_a (mm s^{-1}) est la conductance aérodynamique et g_c (mm s^{-1}) est la conductance du couvert calculée suivant l'équation proposée par Ripley et Saugier (1978):

$$g_c = g L \text{ (mm s}^{-1}\text{)}$$

où g (mm s^{-1}) est la valeur moyenne journalière de la conductance stomatique et L l'indice foliaire.

Au dessus d'une surface rugueuse telle qu'une forêt ou une plantation de palmier à huile, le rapport g_a/g_c est élevé, ce qui rend l'équation de Penman-Monteith (6) peu sensible aux variations de g_a . En conséquence une diminution de g_a de 50 %, qui pourrait être causée par une arrivée d'air instable, se traduit par une baisse de seulement 2 % du taux de transpiration T . La part du rayonnement global (S), transmis sous le couvert n'a pas atteint 20 % du rayonnement net (R_n) (Dufrêne *et al.* à paraître) et par conséquent le flux maximum de chaleur provenant du sol (même très sec) restera inférieur à 20 % du rayonnement net. Cette diminution de 20 % de R_n , due au flux de chaleur du sol, ne conduirait seulement qu'à une diminution de 6 % de la transpiration (T).

Trois profils racinaires ont été observés sur une fosse de 6m creusée à une vingtaine de mètres de la sous-parcelle d'étude. Des tiroirs métalliques de 4 dm^3 ont servi à prélever le volume de sol et les racines, par tranche de 10 cm d'épaisseur.

Calcul du bilan hydrique

Les valeurs moyennes de l'évapotranspiration (E , qui est la somme de la transpiration des palmiers (T) et de l'évaporation du sol) ont été calculées hebdomadairement en saison sèche. Le bilan d'eau est calculé à partir de l'équation suivante :

$$E = P - I_n - \Delta V / \Delta t - D - R$$

où ΔV (mm) est la différence de stock d'eau sur l'intervalle de temps Δt dans la zone occupée par les racines ; I_n (mm j^{-1}) est la fraction de la pluviométrie, interceptée et ré-évaporée par le couvert ; P (mm j^{-1}) est la pluviométrie incidente sur l'intervalle de temps considéré ; D est le drainage sur la même période, entre la zone des racines et les horizons plus profonds. D n'a pas été mesuré directement et a été considéré comme nul en dehors de la période juin à novembre de chaque année. R est le ruissellement de surface qui n'a pu être observé et a été considéré comme négligeable en saison sèche compte tenu de la topographie très plate et de l'indice foliaire élevé (Roose, 1981). Dans cette équation, les remontées capillaires en provenance des horizons profonds ont été considérées comme négligeables.

I_n a été calculé à partir de l'équation :

$$I_n = P - P_s - S_f$$

où P_s (mm) est la pluviométrie transmise, établie par la moyenne des 12 pluviomètres situés au sol et S_f (mm) est le

of water at the basis of the stem after a rainy period. P_s was measured during 1988 and 1989. S_f was not measured directly during our study but the water flow occurring at the basis of the crown leaves (S'_f) was measured from November to February 1990 using an helicoidal rubber water-tight collar fixed around the stem of one palm. The junction between the inner-tube and smoothed trunk above was sealed with a mastic compound to prevent water leaks. The lowest part of the tube was prolonged with a small plastic-tube into a tank with a capacity of 200 litres. The tank was fitted with a tap and emptied twice a day when rainfall occurred. The water flow volume did not exceed the tank capacity during the period of measurements.

$$S'_f = 0.0701(P - 2.3) \quad (r^2 = 0.96, \text{ d.f.} = 15) \quad (7)$$

P_s and S_f were recalculated daily for the whole measurement period (from December 1987 to June 1990) using the following equations:

$$P_s = 0.875(P - 0.44) \quad (r^2 = 0.99, \text{ d.f.} = 241) \quad (8)$$

$$S_f = 0.0713(P - 10.3), \text{ Squire (1984)} \quad (9)$$

The water storage capacity of the canopy was estimated from equation (8) to be 0.44 mm. The slopes of S'_f and S_f versus incident rainfall are similar (equation (7) and (9)) but the intercepts are different and represent the start of water flow at the top (S'_f) and the basis (S_f) of the stem. S'_f and S_f started when P was above respectively 2.3 mm and 10.3 mm (equation (7) and (9)). Consequently the water storage capacity of the stem was calculated as the difference, i.e. 8 mm.

RESULTS

Throughfall (P_s) and stem flow (S_f) were respectively 82 % and 4 % of incident rainfall during the whole period studied (from december 1987 to June 1990). Intercepted rainfall (I_n) was 14 % of P which is slightly higher than data reported by Squire (1985) for oil palm stand in Malaysia but similar to data reported for tropical forest (Table III). Interception losses (I_n) were largely lower for tropical forest than for temperate deciduous and evergreen forests. One of the main reason for that was probably the high intensity of storms observed in tropical areas.

Total biomass of the oil palm root system was $30.5 \text{ t DM ha}^{-1}$ which represents about 43 % of the stand biomass (Dufrene, 1989). As reported in figure 2, primary roots, which are sub-horizontally distributed, concentrated near the surface (96 % within the first 40 cm). Secondary roots were vertically oriented with both positive and negative geotropism, their biomass gradually decreased with depth and reached at least 4.8 m. Fine roots (tertiary and quaternary, diameter lower than 1 mm) are preferentially found in top layers of the soil (49 % within the first 40 cm) but they go down to a depth of at least 4.8 m.

Figure 3 showed the mean changes in soil water content at 10-cm intervals during two successive periods (January and February) and for three different years. The same trend was observed during the three dry seasons: during January, oil palm used preferentially the water reserve of the top soil (0-200-cm soil layer) in contrast with February when water reserve was depleted in the 300-500-cm soil layer. In contrast with 1987 and 1988, December 1989 was very dry ($P = 16.6 \text{ mm}$) and consequently the water uptake in the top layers of the soil was low during January 1990.

flux d'eau recueilli à la base des stipes après un épisode pluvieux. P_s a été mesuré en 1988 et 1989, S_f n'a pas été mesuré directement durant l'étude mais le flux collecté sous les couronnes (S'_f) a été évalué de novembre à février 1990 en utilisant une gouttière hélicoïdale en caoutchouc fixée autour d'un arbre. L'étanchéité entre la gouttière et la surface du stipe a été réalisée au moyen de mastic, pour éviter toute perte. Les eaux collectées étaient recueillies dans un fût de 200 litres qui était jaugé et vidé deux fois par jour en cas de pluie. La capacité du fût n'a pas été dépassée durant la période d'observation. L'équation suivante a pu être établie :

$$S'_f = 0.0701(P - 2.3) \quad (r^2 = 0.96, \text{ ddl} = 15) \quad (7)$$

P_s et S_f ont été recalculés sur une base quotidienne pour l'ensemble de la période d'observation (décembre 1987 à juin 1990) en appliquant les équations suivantes :

$$P_s = 0.875(P - 0.44) \quad (r^2 = 0.99, \text{ ddl} = 241) \quad (8)$$

$$S_f = 0.0713(P - 10.3), \text{ Squire, (1984)} \quad (9)$$

A partir de l'équation (8) la capacité de rétention en eau du couvert a été estimée à 0.44mm. Les pentes des relations donnant S'_f et S_f en fonction de la pluviométrie incidente (équations (7) et (9)) sont très proches mais les ordonnées à l'origine qui représentent le seuil de début de ruissellement au sommet (S'_f) et à la base du stipe (S_f) sont différentes. S'_f et S_f deviennent quantifiables quand P dépasse respectivement 2.3 et 10.3 mm (équation (7) et (9)). Par différence la capacité de stockage du stipe a été évaluée à 8mm.

RESULTATS

La pluviométrie transmise (P_s) et le flux s'écoulant le long des stipes représentent respectivement 82 et 4% de la pluviométrie incidente, sur l'ensemble de la période d'observation (décembre 1987 à juin 1990). L'interception nette (I_n) a représenté 14% de P ce qui est légèrement supérieur aux valeurs citées par Squire (1985) pour une plantation de palmiers à huile en Malaisie, mais très proche des valeurs admises pour une forêt tropicale (Tabl. III). Ces dernières valeurs sont largement inférieures à celles calculées sur forêts tempérées décidues ou sempervirentes. La principale explication à ce phénomène serait liée à une plus grande fréquence des orages en zone tropicale.

La biomasse totale du système racinaire des palmiers atteint $30.5 \text{ t MS ha}^{-1}$ soit 43% de la biomasse totale (Dufrene, 1989). La figure 2 montre que les racines primaires dont la distribution est sub-horizontale se concentrent surtout dans l'horizon de surface (96% entre 0 et 40 cm de profondeur). Les racines secondaires sont orientées verticalement selon un géotropisme positif ou négatif. Leur biomasse diminue régulièrement avec la profondeur. Elles sont présentes jusqu'à 4.80 m ou plus. Les racines fines (tertiaires et quaternaires dont le diamètre est inférieur à 1mm) sont surtout présentes dans les horizons de surface (49% entre 0 et 40 cm) mais on les trouve jusqu'à 4.80 m ou plus.

La figure 3 illustre la variation du stock d'eau disponible au pas de 10 cm, sur deux périodes successives (janvier et février) au cours des trois saisons sèches pour lesquelles la même tendance a pu être observée : en janvier, les palmiers prélèvent préférentiellement la réserve disponible de l'horizon supérieur (0 à 200 cm), alors qu'en février ils utilisent la réserve comprise entre 300 et 500 cm. Le mois de décembre 1989, très peu pluvieux ($P = 16.6 \text{ mm}$) en comparaison avec décembre 1987 ou 1988, a eu pour conséquence un moindre prélèvement d'eau dans l'horizon supérieur, en janvier 1990.

TABLE III. — Dynamic of water from different forested areas were compared with oil palm's. Throughfall (P_s), stemflow (S_f) and net interception (I_n) were calculated as ratio of incident rainfall (P_i). L is the leaf area index. — (Dynamique de l'eau pour différentes régions forestières, comparée à celle d'un couvert de palmiers à huile. La pluviométrie transmise (P_s), le flux s'écoulant à la base des stipes (S_f) et l'interception nette (I_n) ont été rapportés à la pluviométrie incidente (P_i). L est l'indice foliaire)

Authors (Auteurs)	Vegetation type (Type de végétation)	Throughfall (Pluviométrie transmise) P_s/P_i	Stemflow (Flux à la base du stipe) S_f/P_i	Net interception (Interception nette) I_n/P_i	L
Aussenac 1970	<i>Pinus sylvestris</i>	0.67	0.02	0.31	–
	<i>Picea abies</i>	0.64	0.02	0.34	–
	<i>Abies grandis</i>	0.57	0.01	0.42	–
	<i>Fagus sylvatica</i> , <i>Carpinus betulus</i>	0.76	–	–	–
Aussensac & Boulangeat 1980	<i>Fagus sylvatica</i>	0.76	0.03	0.21	–
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0.58	0.06	0.42	–
Nizinski & Saugier 1988	<i>Quercus petraea</i>	0.70	0.01	0.29	4.3
Crockford & Richardson 1990	Eucalyptus temperate forest (Forêt tempérée d'eucalyptus)	0.85	0.04	0.11	–
	Pine forest (Forêt de pins)	0.73	0.09	0.18	–
Bobay 1990	<i>Casanea sativa</i>	0.64	0.09	0.27	3.9
Cachan 1963	Tropical forest (Forêt tropicale)	0.86	–	–	–
Huttel 1975	Tropical Forest (Forêt tropicale)	0.88	0.01	0.12	8.3
Squire 1984	<i>Elaeis guineensis</i>	0.78	0.11	0.11	4.3
Crowther 1987	Tropical Forest (Forêt tropicale)	0.73	0.01	0.26	–
Brunjzeel & Wiersum 1987	<i>Acacia auriculiformis</i>	0.78	0.07	0.15	7.4
Averaged tropical broadleaved forest (Moyenne en forêt tropicale de feuillus)		0.81	0.04	0.16	–
Averaged temperate deciduous forest (Moyenne en forêt tempérée décidue)		0.75	0.04	0.22	–
Averaged temperate coniferous forest (Moyenne en forêt tempérée de conifères)		0.63	0.09	0.25	–
Actual study (Présente étude)	<i>Elaeis guineensis</i>	0.82	0.04	0.14	5.1

Figure 4a showed the seasonal variations in the fractional extractable water calculated for the whole soil profile (520 cm : f_{520}). Note that f_{520} remains high (above 0.4) For the three dry seasons studied. The profile of minimum volumetric soil water content (θ_{MIN}) was roughly parallel to the profile of soil water content at the wilting point (θ_{WP}), ($\theta_{MIN} = 0.995 \theta_{WP} + 3.96$; $r^2 = 0.90$, d.f. = 12). Seasonal trend for daily stomatal conductances was in good agreement with the fractional extractable water in the soil (Fig. 4b). A linear relationship was established between g and f_{520} : g (mm s^{-1}) = $7.44 f_{520} + 0.023$, ($r^2 = 0.48$, d.f. = 106). Consequently a large part (about 52 %) of the stomatal conductance variability remains unexplained with f_{520} changes. Climatological parameters (leaf-air vapour pressure difference, solar radiation) and water content of the top soil also modify the stomatal conductance. As reported in figure 5, the relationships between stomatal conductance (g), E/E_p ratio and "superficial" available water (f_{80}) showed first a rapid increase when fractional extractable water was limiting and then reached 90% of the asymptotic value when f_{80} reached respectively 0.35 and 0.67.

Seasonal changes in interception losses (I_n), evapotranspiration (E) and oil palm transpiration (T) are showed in ta-

La figure 4 a fait apparaître les variations saisonnières de la fraction d'eau disponible calculée sur l'ensemble du profil (f_{520} sur 520cm). On remarquera qu'elle reste supérieure à 40%, y compris lors des trois saisons sèches observées. Le profil d'humidité volumique minimal, (θ_{MIN}) reste approximativement parallèle au profil d'humidité au point de flétrissement (θ_{PP}). ($\theta_{MIN} = 0.995 \theta_{PP} + 3.96$; $r^2 = 0.90$, ddl=12). Les variations saisonnières des conductances stomatiques journalières présentent une évolution comparable à celle de la fraction d'eau disponible (Fig. 4b). Une relation linéaire a été établie en g et f_{520} : g (mm s^{-1}) = $7.44 f_{520} + 0.023$ ($r^2 = 0.48$; ddl=106). En d'autres termes, une large part (environ 52%) des variations de la conductance stomatique demeure inexpliquée par les variations de la fraction d'eau disponible f_{520} . D'autres paramètres climatiques (différence de pression de vapeur d'eau entre l'air et la feuille, rayonnement) ainsi que la réserve en eau de l'horizon de surface modifient également la conductance stomatique. La figure 5 montre que la conductance stomatique (g) et le rapport (E/E_p) restent élevés quand la fraction d'eau disponible dans les horizons superficiels du sol (f_{80}) varie de 1 à respectivement 0,67 et 0,35.

Les variations saisonnières de l'interception nette (I_n), de l'évapotranspiration (E) et de la transpiration du couvert de palmiers (T), rapportées à l'évaporation potentielle (E_p) fi-

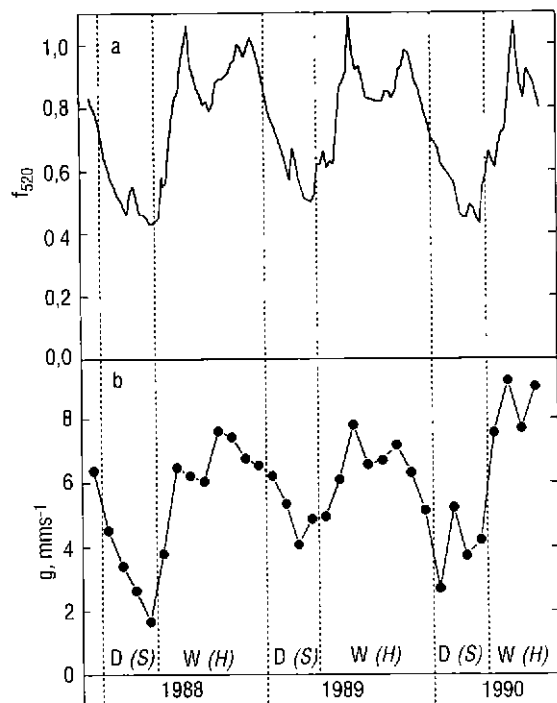


FIG. 4. — Seasonal variations during three years in a) fractional extractable water in the root zone (f_{520}) and b) daily stomatal conductance (g), averaged monthly. Both were measured one day per week. D is the dry season and W is a wet period (without soil water deficit). $g = 7.44 f_{520} + 0.023$ ($r^2 = 0.477$, $d.f. = 106$) — (Variations saisonnières a) de la fraction d'eau disponible du sol f_{520} et b) de la moyenne mensuelle des conductances stomatiques journalières g . Les deux variables ont été mesurées une fois par semaine. S représente la saison sèche et H la saison des pluies (sans déficit hydrique du sol). $g = 7.44 f_{520} + 0.023$ ($r^2 = 0.477$, $d.f. = 106$)

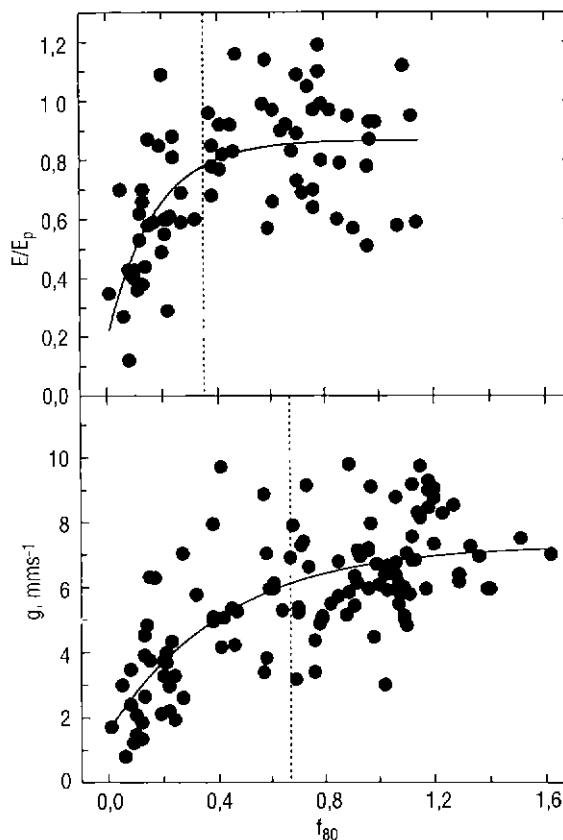


FIG. 5. — Relationship between E/E_p ratio and daily stomatal conductance (g) versus fractional extractable water calculated at a depth of 80 cm (f_{80}) during periods without both drainage and surface runoff. $E/E_p = 0.87 [1 - 0.79 \exp(-5.88 f_{80})]$, $r^2 = 0.435$, $d.f. = 72$. $g = 7.30 [1 - 0.78 \exp(-2.34 f_{80})]$, $r^2 = 0.501$, $d.f. = 117$ — (Relation du rapport E/E_p et de la conductance stomatique journalière g) avec la fraction d'eau disponible du sol sur 80cm de profondeur (f_{80} au cours des périodes sans drainage et sans ruissellement de surface). $E/E_p = 0.87 [1 - 0.79 \exp(-5.88 f_{80})]$, $r^2 = 0.435$, $d.f. = 72$. $g = 7.30 [1 - 0.78 \exp(-2.34 f_{80})]$, $r^2 = 0.501$, $d.f. = 117$)

ble IV as ratio of potential evaporation (E_p). Weekly (I_n , E) and daily (T) values were averaged over three different climatological periods :

- dry seasons which are included between January and April (without drainage and surface runoff);
- rainy seasons which occurred from May to December (soil water storage was largely enough to avoid water deficit during low rainfall period in August).
- short periods with a good soil water availability (f_{520} higher than 0.7 and f_{80} higher than 0.4), with very little rainfall (Runoff \cong 0) and without drainage ($D = 0$).

The E/E_p ratio decreased from 0.81 during favourable periods to 0.62 (averaged for the three dry seasons) with a minimum of 0.56 for 1988 dry season. T/E_p showed a similar decrease from 0.70 to 0.56 (Table IV). Potential evaporation remains the same during the three dry seasons (about 3.5 mm d^{-1}) even though evapotranspiration and transpiration rates shown large differences. Soil evaporation calculated as a difference between E and T ranged between 0.2 mm d^{-1} during the dry seasons and 0.3 mm d^{-1} during the rainy seasons. $(E - T)/E_p$ ranged from 0.05 to 0.09. The intensity of water deficit was similar during 1988 and 1990 dry seasons but

gurent au tableau IV. Les moyennes des données hebdomadaires (I_n , E) ou journalières (T) ont été calculées pour trois périodes climatiques distinctes .

- les saisons sèches réparties de janvier à avril (pas de drainage ni de ruissellement de surface) ;
- les saisons des pluies, de mai à décembre (l'eau du sol était en quantité suffisante pour éviter un déficit hydrique en août, moins pluvieux) ;
- les courtes périodes (favorables) à forte disponibilité en eau (f_{520} et f_{80} supérieures respectivement à 0.7 et à 0.4), peu arrosées (ruissellement pratiquement nul) et sans drainage ($D=0$).

Le rapport E/E_p a diminué de 0.81 au cours des périodes favorables jusqu'à 0.62 (en moyenne sur les 3 saisons sèches) avec un minimum de 0.56 en 1988. Le rapport T/E_p a varié de façon similaire de 0.70 à 0.56 (Tabl. IV). L'évaporation potentielle est restée sensiblement constante (environ 3.5 mm j^{-1}) durant les trois saisons des pluies alors que l'évapotranspiration et la transpiration présentaient de larges variations interannuelles. L'évaporation du sol calculé par différence entre E et T a varié entre 0.2 mm j^{-1} au cours des saisons sèches et 0.3 mm j^{-1} en saison des pluies. Le rapport $(E-T)/E_p$ a varié de 0.05 à 0.09. L'intensité du déficit hydrique a été similaire au cours des saisons sèches 1988 et 1990, bien qu'en 1990 la saison sèche ait débuté et se soit arrêtée plus précocement qu'en 1988. En 1989 il n'a pas été

TABLE IV. — Comparison between seasonal changes in interception losses (I_n), stand evapotranspiration (E) and canopy transpiration (T) as ratio of potential evaporation (E_p). g , g_a and g_c were respectively leaf stomatal conductance, aerodynamic conductance and canopy conductance. Dry season was from January to April included and rainy season during all other months. — (Comparaison entre les variations saisonnières de l'interception nette (I_n), l'évapotranspiration de la parcelle (E) et la transpiration du couvert (T) rapportés à l'évaporation potentielle (E_p) - g , g_a et g_c sont respectivement la conductance stomatique des feuilles, la conductance aérodynamique et la conductance du couvert. Les saisons sèches vont de janvier à avril inclus et les saisons des pluies représentent la période restante)

Period (Période)	E_p mm d ⁻¹	I_n/E_p	E/E_p	g mm s ⁻¹	g_a mm s ⁻¹	g_c mm s ⁻¹	T/E_p
Dry season (Saison sèche) 1988	3.57 (0.27) ⁽¹⁾	0.05 (0.03)	0.56 (0.08)	3.0 (0.8)	70.9 ⁽²⁾ (21.9)	13.2 (3.3)	0.35 ⁽²⁾ (0.11)
Dry season (Saison sèche) 1989	3.52 (0.26)	0.05 (0.03)	0.71 (0.09)	5.4 (1.3)	54.3 (9.8)	29.9 (7.1)	0.68 (0.07)
Dry season (Saison sèche) 1990	3.51 (0.32)	0.07 (0.05)	0.59 (0.18)	3.3 (0.9)	(3)	20.2 (11.6)	(3)
Dry seasons (Saisons sèches) Total	3.54 (0.16)	0.07 (0.02)	0.61 (0.07)	4.1 (1.0)	61.6 (9.4)	21.8 (5.9)	0.56 (0.08)
Rainy seasons (Saisons des pluies)	3.14 (0.11)	(4)	(4)	6.6 (0.5)	60.3 (9.5)	31.9 (2.9)	0.69 (0.04)
Good soil water availability (Bonne disponibilité en eau du sol)	3.22 (0.92)	0.11 (0.04)	0.81 (0.05)	6.0 (1.5)	46.5 (10.6)	32.3 (9.5)	0.72 (0.08)

(1) (): confidence interval — (Intervalle de confiance) ($p < 0.05$)

(2) Period with failure in climatological data acquisition system: only 7 among 16 daily set of data availables
(Période d'acquisition partielle des données climatologiques : 7 jours disponibles sur 16)

(3) Period with failure in climatological data acquisition system: no data available
(Période d'acquisition partielle des données climatologiques : données non disponibles)

(4) Drainage and surface runoff were not negligible during rainy season and did not permit I_n and E calculations

(Le drainage et le ruissellement non négligeables en saison des pluies n'ont pas permis le calcul de I_n et E sur cette période)

1990 dry season started and stopped earlier than 1988 one. During 1989, no effective water deficit was measured; T/E_p was similar during 1989 dry season and rainy seasons (about 0.68).

enregistré de déficit hydrique. le rapport T/E_p est resté similaire au cours de la saison sèche à celui enregistré en saison des pluies (environ 0.68).

DISCUSSION

In contrast with previously reported data (Ruer, 1969; Gray, 1969; Hartley, 1988) in where the oil palm root system did not exceed 2-metres deep, in the deep ferrallitic sandy soil of Ivory Coast the oil palm root system was found to reach at mean a depth of 4.8 m (Fig. 2). The role of this deep root system was not only for mechanical stability but also for uptake of water during the large dry season (Fig. 3) generally observed in west African oil palm cultivation areas. The water uptake during February in the 300-500-cm soil layer was higher than in the 0-200-cm soil layer for the three years studied. The high amount of rainfall, occurring generally during March, did not permit a comparison between annual water uptake but the low amount of rainfall that occurred during April 1988 showed that the trend for a deep water uptake can occur during all the dry season.

The high amount of extractable soil water (437 mm), which was a consequence of the deep root zone, does not prevent an early stomatal closure. In fact, oil palm stomata appeared to be highly sensitive to the water content of the top layers of the soil and stomatal conductance decreased from 7.3 mm s^{-1} when f_{80} was higher than 0.67 to about 1.5 mm s^{-1} when f_{80} was below 0.1 (Fig. 5). A small amount of rainfall occurred during the dry season i.e. 16.7 mm the 01/04/1988, induced no change in f_{520} (0.46) but an important change in both f_{80} (from 0.12 to 0.20) and stomatal conductance which increased from

DISCUSSION

Contrairement aux résultats publiés antérieurement (Ruer, 1969 ; Gray, 1969 ; Hartley, 1988) qui limitaient la présence de racines de palmier à huile à 2m de profondeur, sur les sols ferrallitiques sableux de Côte-d'Ivoire, le système racinaire a été identifié jusqu'à une profondeur d'au moins 4.8m (Fig. 2). Ce système racinaire profond n'a pas seulement un rôle d'ancrage, il sert à prélever de l'eau au cours des longues saisons sèches fréquentes dans les zones de culture du palmier à huile en Afrique de L'Ouest. En février, sur les trois saisons sèches observées, le volume d'eau prélevé dans l'horizon 300-500 cm a été plus important que celui de l'horizon 0-200cm. La pluviosité, généralement plus prononcée en mars n'a pas permis de comparaison interannuelle des prélèvements d'eau mais la faible pluviosité d'avril 1988 a montré que la tendance à une consommation d'eau en profondeur peut apparaître sur toute la saison sèche.

L'importance de la quantité d'eau disponible (437mm) sur le profil occupé par les racines, ne suffit pas pour éviter une fermeture précoce des stomates. En fait, les stomates du palmier à huile semblent être très sensibles à la réserve en eau de l'horizon de surface et la conductance stomatique a chuté de 7.3 mm s^{-1} quand f_{80} était supérieur à 0.67, à environ 1.5 mm s^{-1} lorsque f_{80} est devenu inférieur à 0.1 (Fig. 5). Une petite pluie survenue en saison sèche (16.7mm le 01/04/1988) n'a pas affecté f_{520} mais a nettement augmenté f_{80} (de 0.12 à 0.20) et la conductance stomatique (de 1.85 mm s^{-1} , le 29/03/1988 avec $E_p=3.3 \text{ mm j}^{-1}$, à 3.29 mm s^{-1} , le 5/04/1988 avec $E_p=3.8 \text{ mm j}^{-1}$). Du fait que les stomates du palmier à huile sont très sensibles au déficit de saturation

1.85 mm s⁻¹ (29/03/1988, E_p = 3.3 mm d⁻¹) to 3.29 mm s⁻¹ (05/04/88, E_p = 3.8 mm d⁻¹). As oil palm stomata are very sensitive to leaf-air vapour pressure difference (VPD), the observed increase in stomatal conductance with a small amount of rainfall was probably the result of first a rapid decrease in VPD during the rainy day and of an increase in top soil layer water storage during few days.

The E/E_p (0.75) and E/E_{pr} (0.84) ratios, averaged yearly for an oil palm stand with a water balance method, were higher than data reported for Banco forest (Huttel, 1975) which is situated 15 km away from La Mé plantation (Table V). One reason could be the large amount of rainfall occurred during 1989 "dry season". The E/E_p ratios observed for temperate forest without soil water deficit are quite similar with value for oil palm (0.81, Table V).

T/E_p ratios for oil palm stand reported in table IV and V were slightly higher than transpiration ratio measured on cotton (Fuchs *et al.*, 1989) and on sweet chestnut (Bobay, 1991). T/E_{pr} ratio measured for dry oil palm canopy agreed well with data reported for dry forest canopies (McNaughton and Jarvis, 1983; Shuttleworth *et al.*, 1984). Data reported by Monteny (1987) for Rubber canopy and by Viswanadham *et al.* (1991) for Amazonian forest showed T/E_{pr} higher than

en vapeur d'eau de l'air (VPD), l'augmentation de la conductance stomatique due à une petite précipitation, résulte probablement d'abord d'une baisse rapide du VPD le jour de la pluie et d'une augmentation de la capacité en eau de l'horizon de surface, pendant quelques jours.

Les rapports E/E_p(0.75) et E/E_{pr}(0.84) qui ont été trouvés en moyenne sur la parcelle de palmier à huile, en utilisant la méthode du bilan hydrique, sont plus élevés que les valeurs mesurées dans la forêt du Banco (Huttel, 1975), située à 15 km de la station de La Mé (Tabl. V). Une explication possible pourrait être l'importance de la pluviométrie enregistrée au cours de la "saison sèche" 1989. Les rapports E/E_p observés sur forêt en climat tempéré, en l'absence de déficit hydrique du sol, sont tout à fait similaires aux valeurs trouvées pour le palmier à huile (0.81, Tabl. V).

Les rapports T/E_p du couvert de palmiers, figurant dans les tableaux IV et V, sont légèrement supérieurs aux taux de transpiration mesurés sur coton (Fuchs *et al.*, 1989) et sur châtaignier (Bobay, 1990). Le rapport T/E_{pr} mesuré sur le couvert de palmier, sans eau libre, se rapproche des valeurs citées pour des forêts dans les mêmes conditions (McNaughton et Jarvis, 1983, Shuttleworth, *et al.*, 1984). Les valeurs de T/E_{pr} fournies par Monteny (1987) pour un couvert d'hévéas et par Viswanadham *et al.*, (1991) pour la forêt amazonienne sont supérieures à un maïs elles prennent probablement en compte l'évaporation d'eau provenant de l'interception de la rosée.

TABLE V. — Evapotranspiration (E) measured with a water balance method and transpiration (T) estimated with three different methods were compared for different types of vegetation. E_p is the potential evaporation (Penman) and E_{pr} is the equilibrium evaporation (radiative term of the Penman equation). — (Evapotranspiration (E) calculée à partir du bilan hydrique et la transpiration (T) estimée par trois méthodes différentes, ont été comparées pour trois types de couvert. E_p est l'évaporation à potentielle (Penman) et E_{pr} est l'évaporation à l'équilibre -terme radiatif de l'équation de Penman)

Authors (Auteurs)	Type of vegetation (Type de végétation)	E/E _p	T/E _p	E/E _{pr}	T/E _{pr}
Katerji & Perrier 1983	Temperate crops (Cultures tempérées)	—	—	—	1.15 ⁽¹⁾
McNaughton & Jarvis 1983	Temperate crops and grasses (Cultures tempérées et pâturages)	—	—	—	1.08-1.85 ⁽¹⁾
Aussenac & Boulangeat 1980	Temperate coniferous forest (Forêt tempérée de conifères)	0.64	—	—	—
	Temperate deciduous forest (Forêt tempérée décidue)	0.76	—	—	—
McNaughton & Jarvis 1983	Temperate forest (Forêt tempérée)	—	—	—	0.31-0.92 ⁽¹⁾
Nizinski & Saugier 1989	Temperate deciduous forest (Forêt tempérée décidue)	0.83	—	—	—
Hutchison & Baldocchi 1989	Temperate deciduous forest (Forêt tempérée décidue)	—	—	—	0.31-0.61 ⁽³⁾
Bobay 1990	Temperate deciduous forest (Forêt tempérée décidue)	0.76	0.64 ⁽²⁾	—	—
Monteny 1987	Tropical crops (Cultures tropicales)	—	—	—	1.14 ⁽¹⁾
	Tropical grasses (Prairies tropicales)	—	—	—	1.23 ⁽¹⁾
Fuchs <i>et al.</i> 1989	Cotton crop (Plantation coton)	—	0.71 ⁽¹⁾	—	—
		—	0.76 ⁽²⁾	—	—
		—	0.67 ⁽³⁾	—	—
Huttel 1975	Tropical forest (Forêt tropicale)	0.71	—	0.75	—
Shuttleworth <i>et al.</i> 1984	Tropical forest (Forêt tropicale)	—	0.68 ⁽¹⁾	—	—
Monteny 1987	Rubber crop (Plantation hévéa)	—	—	0.76	1.10 ⁽¹⁾
	Tropical forest (Forêt tropicale)	—	—	0.74	—
Viswanadham <i>et al.</i> 1991	Tropical forest (Forêt tropicale)	—	—	—	1.03 ⁽¹⁾
Actual study on oil palm crop (Présente étude sur plantation palmier à huile)	Yearly data (Données annuelles)	0.75	0.69 ⁽³⁾	0.84	0.71 ⁽³⁾
	No water deficit (Sans déficit hydrique)	0.81	0.72 ⁽³⁾	0.91	0.76 ⁽³⁾

(1) Energy Balance Method (Méthode "balance d'énergie")

(2) Sap Flow method (Méthode "flux de sève")

(3) Penman-Monteith equation (Equation Penman-Monteith)

one but they possibly take into account some free water evaporation from dew interception.

All the T/E_{pr} data reported for grasslands and crops exceeded one because of both low aerodynamic conductance (between 5 and 50 mm s^{-1}) and high canopy conductance (between 17 and 60 mm s^{-1}) characteristics for short crops and grassland (McNaughton and Jarvis, 1983). The mean aerodynamic conductance (g_a) was about 60 mm s^{-1} for oil palm canopy (Table IV). That low value, compared with forest data ($g_a : 100 - 200 \text{ mm s}^{-1}$; McNaughton and Jarvis, 1983) was a consequence of both the short size of the oil palm canopy (12 m) compared with forest (generally 30-50 m height) and also the low wind speed observed in the studied area (about 1.2 m s^{-1}). The canopy conductances (g_c), calculated with the high stomatal conductances (g) observed for oil palm (Table IV), exceeded the values of g_c reported for temperate and tropical forests ($g_c : 10-25 \text{ mm s}^{-1}$; McNaughton and Jarvis, 1983; Shuttleworth, 1989). We can conclude that characteristics of oil palm canopy for water vapour exchanges were intermediate between short crops and forest vegetation.

CONCLUSION

At high values of soil water storage the evapotranspiration rate of the dry canopy (E) was 81 % of the potential evaporation (E_p , Penman-Van Bavel) which is a value commonly observed in temperate deciduous forests.

Net by interception of rain (I_n) represents 14 % of the yearly rainfall. This value compares well with tropical broadleaved forests but it is largely below the values reported for temperate deciduous and coniferous forests. Thus the rainfall pattern seems more important for net interception than the structure of the canopy. In tropical climate, rainfall occurred generally in the form of storms with a large amount of rain in a short time which reduced the efficiency in the canopy interception.

The results showed the capacity for oil palm trees to use water at great depth in the root zone. However the fraction of extractable water in the soil (5.2 m deep, f_{520}) was never reduced below 0.4 even during the driest season in 1988. The reason was an early stomatal closure which occurred when the fraction of extractable water of the top 80 cm of soil (f_{80}) decreased below 0.67. Stomatal closure induced a decrease in transpiration rate and the ratio E/E_p reached a minimum value of 0.2 when stomatal conductance, f_{80} and f_{520} were respectively 1.5 mm s^{-1} , 0.1 and 0.4.

Acknowledgements. — This work was supported by the Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux (IRHO/CIRAD). We are grateful to the management and staff at La Mé research station (Ivory Coast) for their help. We would like to thank R. Ochs for his help in setting up the project and B. Tailliez for his help in field measurements.

Toutes les valeurs de T/E_{pr} citées pour les pâturages et cultures dépassent 1, en raison, à la fois d'une conductance aérodynamique faible (entre 5 et 50 mm s^{-1}) et d'une conductance du couvert élevée (entre 17 et 60 mm s^{-1}). Ces caractéristiques sont propres aux cultures de faible hauteur et aux pâturages (Mc Naughton et Jarvis, 1983). La conductance aérodynamique (g_a) pour le palmier à huile a été évaluée à 60 mm s^{-1} (Tabl. IV). Cette valeur faible comparée à celle des forêts ($g_a : 100-200 \text{ mm s}^{-1}$, Mc Naughton et Jarvis, 1983) est la conséquence à la fois de la faible hauteur des palmiers (12m) en regard de la taille des arbres d'une forêt (en général 30-50m de haut) et de la vitesse du vent particulièrement faible sur le site observé (environ 1.2 m s^{-1}). Les conductances du couvert (g_c) calculées à partir des conductances stomatiques (g) élevées pour le palmier (Tabl. IV) sont supérieures aux valeurs de g_c citées pour les forêts tropicales et tempérées ($g_c : 10-25 \text{ mm s}^{-1}$; Mc Naughton et Jarvis, 1983, Shuttleworth, 1989). On peut en conclure qu'un couvert de palmier à huile se comporte vis à vis des échanges de vapeur d'eau, de façon intermédiaire entre cultures basses et forêts.

CONCLUSION

En condition de réserve hydrique du sol élevée, l'évapotranspiration (E) du couvert "sec" a été de 81% de l'évaporation potentielle (E_p , Penman-Van Bavel), ce qui peut être fréquemment observé sur forêts décidues des régions tempérées.

L'interception nette de la pluie (I_n) représente 14% de la pluviométrie annuelle. Cette valeur est comparable à celle des forêts tropicales de feuillus mais elle est très en dessous des grandeurs citées pour les forêts décidues ou de conifères des régions tempérées. La répartition de la pluviométrie semble aussi plus déterminante que la structure du couvert, pour l'interception nette. Sous climat tropical, les pluies se présentent généralement sous forme d'orage libérant des quantités d'eau importantes sur un bref intervalle de temps, ce qui diminue l'efficacité de l'interception par le couvert.

Les résultats ont montré que les palmiers ont une forte aptitude à consommer de l'eau dans l'horizon profond occupé par les racines. Cependant, la part de l'eau disponible du sol (5.20m de profondeur, f_{520}) n'est jamais descendue en dessous de 0.4 même au cours de la saison la plus sèche en 1988. Ceci est dû à une fermeture précoce des stomates qui se déclenche lorsque la fraction d'eau disponible sur les 80 premiers cm de sol (f_{80}) devient inférieure à 0.67. La fermeture des stomates entraîne une baisse de la transpiration et le rapport E/E_p atteint une valeur minimale de 0.2 lorsque la conductance stomatique, f_{80} et f_{520} , atteignent respectivement les valeurs 1.5 mm s^{-1} , 0.1 et 0.4.

Remerciements. — Ce travail a été réalisé à l'Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux (IRHO/CIRAD). Nous sommes reconnaissants à la direction et au personnel de la station de recherche de La Mé en Côte-d'Ivoire pour leur participation. Nous adressons nos remerciements, pour l'aide qu'ils nous ont apportée, à R. Ochs dans l'élaboration du projet et B. Tailliez dans les mesures au champ.

REFERENCES

- [1] AUSSENAC G , 1970 - Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. *Ann Sci Forest* , 27(4), 383-389.
- [2] AUSSENAC G & BOULANGEAT C. . 1980. - Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Murb.) Franco). *Ann. Sci Forest* , 37(2), 91-107
- [3] BOBAY V , 1990 - Influence d'une éclaircie sur le flux de sève et la transpiration de taillis de châtaigniers Thèse de Doctorat, Université d'Orsay, France, 142p.
- [4] BRUINJZELL L.A. & WIERSUM K.F. 1987 - Rainfall interception by a young *Acacia auriculiformis* (A. cunn) plantation forest in West Java. Indonesia : application of Gash's analytical model. *Hydrological processes*, 1, 309-319
- [5] CACHAN P. . 1963 - Signification écologique des variations microclimatiques verticales dans la forêt sempervirente de basse Côte d'Ivoire *Ann Fac Sci. Dakar*, 8, 89-155.
- [6] CROCKFORD R H & RICHARDSON D.P., 1990 - Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia IV The relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of these forests, and the effect on interception of thinning the pine plantation *Hydrological Processes*. 4, 169-188.
- [7] CROWTHER J , 1987. - Ecological observations in tropical karst terrain, West Malaysia. II - Rainfall interception, litterfall and nutrient cycling. *J Biogeography*, 14, 145-155
- [8] DEVUYST A., 1948. - Influence des pluies sur les rendements du palmier à huile enregistrés à la station de La Mé de 1938 à 1946. *Oléagineux*. 3(3), 137-144.
- [9] DUFRENE, E , 1989 - Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq) Thèse de Doctorat, Université d'Orsay, France. 157p.
- [10] FUCHS M., COHEN Y., MORESHET S & COHEN Y , 1989. - Experimental verification of a meteorological transpiration model *Agronomie*, 9, 827-832
- [11] GRAY B.S., 1969. - A study of the influence of genetic, agronomic and environmental factors on the growth, flowering and bunch production of the Oil palm on the west coast of West Malaysia Ph D Thesis, University of Aberdeen, England, 947p.
- [12] HARTLEY C.W.S , 1988. - The Oil palm Tropical Agric. Series, 3rd edition, Longman & Wiley & Sons, New York, 761p
- [13] HUTCHISON B.A. & BALDOCCHI D D., 1989 - Forest Meteorology. In : JOHNSON D.W. & VAN HOOK R I (eds), *Analysis of Biogeochemical Cycling Processes in Walker Branch Watershed*, Chap. 3, Springer-Verlag, New York, 21-95.
- [14] HUTTEL C., 1975 - Recherches sur l'écosystème de la forêt sub-équatoriale de la basse Côte d'Ivoire. IV - Estimation du bilan hydrique *La terre et la vie / Revue d'écologie appliquée*, 2, 192-202.
- [15] KATERJI N., PERRIER A & OULID-AISSA A K , 1983 - Exploration au champ et interprétation de la valrnière horizontale et verticale de la résistance stomatique: cas d'une culture de luzerne (*Medicago sativa* L.) *Agronomie* 3(9): 847-856
- [16] KATERJI N. & PERRIER A., 1983. - Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne : rôle d'un coefficient cultural. *Agronomie*, 3(6), 513-521.
- [17] McNAUGHTON K G & JARVIS P.G . 1983 - Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation In *Water Deficits and Plant Growth*, Vol VII, KOSLOWSKI T.T.(ed.), Academic Press, New York, 1-47.
- [18] MONTEITH J L , 1965 - Evaporation and environment In FOGG G E (Ed), *The state and Movement of water in Living Organisms*, 19th Symp Soc. Exp. Biol., The Company of Biologists. Cambridge University Press, 205-234.
- [19] MONTEITH J.L & UNSWORTH M H , 1990 - Momentum transfer In : MONTEITH J L. & UNSWORTH M H (eds.), *Principles of Environmental Physics*, Chap 7, 2nd edition, Edward Arnold, London, 101-120
- [20] MONTENY B., 1987 - Contribution à l'étude des interactions végétation - atmosphère en milieu tropical humide Thèse Doctorat d'Etat, Université d'Orsay, France, 170p.
- [21] NIZINSKI J. & SAUGIER B , 1988 - Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Oecol. Plant.*, 9(3), 311-329.
- [22] NIZINSKI J & SAUGIER B. 1989 - Dynamique de l'eau dans une chênaie (*Quercus petraea* (Matt) Liebl.) en forêt de Fontainebleau. *Ann. Sci For* , 46, 173-186
- [23] OCHS R., 1977 - Les contraintes écologiques du développement des oléagineux pérennes (palmier à huile et cocotier) en Afrique occidentale et centrale Choix de la plante en fonction du climat et du sol. *Oléagineux*. 32(1), 461-468.
- [24] OLIVIN J. & OCHS R., 1978 - Propriétés hydriques des sols et alimentation en eau des oléagineux pérennes en Afrique de l'Ouest. *Oléagineux*, 33(1), 1-12.
- [25] PENMAN H.L.. 1948. - Natural evaporation from open water, bare soil and grass *Proc R Soc Lond A*. 193, 120-145
- [26] RIPLEY E A & SAUGIER B , 1978 - Biophysics of a natural grassland: evaporation *J of Applied Ecology* 15 459-479.
- [27] ROOSE E., 1981. - Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale *Travaux et documents de l'O R S T O M* , 130, 569p
- [28] RUER P , 1969 - Système racinaire du palmier à huile et alimentation hydrique. *Oléagineux*. 24(6). 327-330
- [29] SHUTTLEWORTH W J , GASH J H.C. LLOYD C R., MOORE C.J ROBERTS J , MARQUES FILHO A.O., FISCH G. SILVA FILHO V P , GOES RIBEIRO M.N., MOLION L.C.B., ABREU L.D., NOBRE J C.A , CABRAL O.M R., PATEL S.R. & MORAES J C., 1984 - Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. *Quart J. R. Met Soc.*, 110, 1143-1162
- [30] SHUTTLEWORTH W J , 1989 - Micrometeorology of temperate and tropical forest *Phil Trans R Soc Lond B*, 324, 299-334
- [31] SPARNAAIJ L.D., REES A R & CHAPAS L C 1965. - Variations de la production annuelle du palmier à huile *Oléagineux*, 20(11), 661-666
- [32] SQUIRE G.R , 1984 - Techniques in environmental physiology of Oil palm II - Partitioning of rainfall above ground. *P O R I M Bull* , 9, 1-9
- [33] SQUIRE G R . 1985 - Techniques in environmental physiology of Oil palm. III - Evaporation *P O R I M Bull* , 11, 1-11.
- [34] VAN BAVEL C.H.M , 1966. - Potential evaporation The Combination Concept and its Experimental Verification. *Water Resou. Res.* 2, 3, 455-457.
- [35] VISWANADHAM Y . SILVA FILHO V P & ANDRE R G B . 1991. - The Priestley-Taylor parameter a for the Amazon forest *Forest Ecology and Management*, 38, 211-225.

RESUMEN

Variación de la evapotranspiración de una cubierta de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) sometida a un déficit hídrico temporero del suelo

E. DUFRENE, B. DUBOS, H. REY, P. QUENCEZ y B. SAUGIER, *Oléagineux*, 1993, 48, N°3, p. 105-120

La evapotranspiración (E) y las pérdidas por intercepción neta (I_n) se midieron en una parcela de palmas africanas (*Elaeis guineensis* Jacq.) entre 1988 y 1990, utilizando un método de balance hídrico con ritmo semanal. Se usaron mediciones de conductancia estomática, índice foliar y climatología para calcular la transpiración de la cubierta de palmas mediante la ecuación de Penman-Monteith. En condiciones de suministro de agua al suelo no limitantes, la evapotranspiración representa un 81 % de la evaporación potencial (E_p , Penman, 1948; modificado por Van Bavel, 1966), la relación de la transpiración por la evaporación potencial (T/E_p) está comprendida entre 0,69 y 0,72 y la conductancia estomática (g) entre 6,0 y 6,6 mm s^{-1} . En la estación seca severa del año 1988 las relaciones E/E_p y T/E_p disminuyeron hasta 0,56 y 0,35 respectivamente. La intercepción neta de las precipitaciones representa un 11 % de la evaporación potencial durante la estación de lluvias y un 5 % durante la estación seca. En las tres estaciones secas estudiadas, la reserva de agua del suelo en la zona radical (5,2 m de profundidad) quedó mayor de un 40 % de la reserva útil. Esto puede interpretarse como una consecuencia del cierre precoz de los estomas cuando la reserva de agua en los primeros 80 centímetros de suelo (f_{80}) es menor de un 67 % de la reserva útil. Cuando f_{80} es menor de un 35 % de la reserva útil E/E_p decrece rápidamente hasta llegar a 0,1, lo que corresponde a una conductancia estomática de 1,5 mm s^{-1} .

Palabras claves. — Intercepción neta de las lluvias, conductancia estomática, conductancia aerodinámica de la cubierta, balance hídrico, reserva útil de agua, profundidad del arraigo.