

RECHERCHES SUR L'ECOSYSTEME
DE LA FORET SUBEQUATORIALE DE BASSE COTE-D'IVOIRE
IV. ESTIMATION DU BILAN HYDRIQUE

par C. HUTTEL

Le bilan hydrique d'un couvert végétal peut être exprimé selon la formule générale : $P = ETR + R + D \pm \Delta H$
où : P = précipitations à découvert ; ETR = évapotranspiration réelle ; R = pertes par ruissellement ; D = pertes par drainage profond, et ΔH = variations du stock d'eau du sol.

En forêt, le couvert végétal intervient de façon complexe dans la distribution des eaux de pluie :

$$P = P_{\text{sol}} + E_t + I$$

où : P_{sol} = pluies sous couvert (« throughfall ») ; E_t = écoulement le long des troncs (« stemflow »), et I = interception vraie.

1. LES PRÉCIPITATIONS (fig. 11 à 13, F). — La grande saison sèche et la grande saison humide sont les plus marquées mais on a observé une grande variabilité d'une année à l'autre : saison sèche peu marquée ou bien particulièrement rigoureuse, saison des pluies bien individualisée ou caractérisée par des alternances de périodes plus ou moins pluvieuses. La petite saison sèche n'apparaît pas tous les ans, mais elle peut aussi être de la même importance que la grande saison sèche. Cette variabilité se retrouvera au niveau des réserves d'eau du sol.

2. ECOULEMENT LE LONG DES TRONCS, E_t . — Il a été mesuré pendant plus d'une année dans la forêt du Banco sur une parcelle de 300 m² où tous les arbres (16) étaient munis d'une gouttière en plastique enroulée en spirale à la base du tronc. Cet écoulement est faible et représente moins de 1 % des précipitations sous couvert (fig. 9).

Des valeurs analogues ont été trouvées au Ghana (Nye 1961). Par contre nos valeurs sont sensiblement inférieures à celles obtenues par Freise (1936) au Brésil : 28 %. A Porto-Rico, Kline, Jordan et Drewry (1968, cité par Odum, More et Burns 1970) ont, à partir de mesures sur 27 arbres, construit des équations mettant

en relation l'écoulement et les précipitations pour différentes classes de tailles d'arbres ; ils estiment ainsi à 18 % le pourcentage des précipitations arrivant au sol par cette voie. Dans la même forêt, Sollings et Drewry (1970) ont trouvé par des mesures sur arbres isolés 1 % seulement en rapportant les volumes recueillis à la surface de la couronne des arbres.

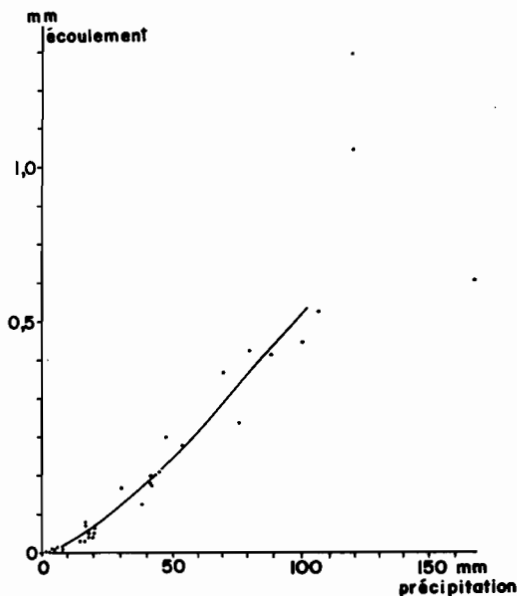


Figure 9. — Ecoulement d'eau le long des troncs en fonction des précipitations sous couvert.

3. PRÉCIPITATIONS SOUS COUVERT, P_{sol} . — Elles sont recueillies par des auges rectangulaires ayant 500 cm² de surface collectrice et un profil évitant les pertes par éclaboussures. Ces pluviomètres sont posés à 50 cm au-dessus du sol et les eaux sont collectées dans des bidons de 25 l. La précision de mesure hebdomadaire est de 5 ml ou 5 g c'est-à-dire 0,1 mm de pluie. Le nombre de pluviomètres utilisés a été porté de 3 à 6, puis à 12, et enfin à 24. A partir de 12 pluviomètres, la précision obtenue sur la moyenne est de 10 % lorsque les précipitations dépassent 5 mm.

La complexité de la forêt sempervirente et le désir d'obtenir des résultats analysables statistiquement nous ont fait choisir une répartition au hasard.

4. INTERCEPTION TOTALE, $E_t + I$. — A la station du plateau de la forêt du Banco, un petit chablis naturel a permis de faire des mesures de précipitations à découvert et l'interception a été

estimée à 15 %. Mais la faible étendue de ce chablis pouvait modifier localement par effets aérodynamiques l'importance des précipitations (Ullah et coll. 1970).

La méthode indirecte qui consiste à comparer les précipitations sous couvert aux relevés pluviométriques des postes météorologiques les plus proches ne permet de faire cette comparaison que sur des périodes de temps assez longues en raison de la grande hétérogénéité des précipitations en pays tropical. Le poste de l'École forestière du Banco, distant de 2,2 km de nos parcelles, permet de calculer sur les trois années de mesures (1969-1971) une interception de 10 à 12 %. Les mesures du poste pluviométrique du C.T.F.T. à Yapo-Sud, situé à 3,5 km de notre parcelle de Yapo, permettent d'estimer l'interception à 22 %. Cette forte différence est en accord avec Czarnowski et Olzewski (1968) qui proposent une relation entre l'interception et les caractéristiques du peuplement :

$$I = f(H \sqrt{SN})$$

où : I = interception ; H = hauteur du peuplement ; S = aire basale du peuplement ; et N = densité du peuplement.

Dans notre cas, la forêt de Yapo, qui est la plus dense, a le taux d'interception le plus élevé.

Les travaux d'autres auteurs ont conduit à des valeurs variables : 38 % dans une forêt subtropicale du Brésil (Freise 1936), 28 % dans une plantation serrée de *Shorea robusta* au Bengale (Dabral et Rao 1969), 17 % au Panama (McGinnis et coll. 1969), 12 à 26 % à Porto-Rico (Odum et coll. 1970, Kline et Jordan 1968), 15 % au Ghana (Nye 1961), 5 % au Costa-Rica (McColl 1970), 3 % au Nigeria (Hopkins 1965).

Ces taux d'interception sont des moyennes calculées sur des durées plus ou moins longues.

5. RUISSELLEMENT, R. — Les parcelles de mesure ont été implantées dans des endroits plats où le ruissellement diffus ne peut jouer qu'un rôle réduit. Roose (1967) a montré que dans le bilan annuel le ruissellement n'atteint pas 1 % des précipitations dans les forêts même sur forte pente.

6. DRAINAGE, D. — Les eaux de pluie qui, en saison humide, percolent le sol, dépassent les horizons exploités par les racines et atteignent la nappe phréatique, sortent de l'écosystème. Les méthodes proposées pour la mesure du drainage sont soit inutilisables en forêt, soit trop imprécises pour l'établissement d'un bilan (Roose et Henry des Turreaux 1970). Il nous a donc été impossible de calculer un bilan hebdomadaire lorsque le front d'humectation du sol descendait au-delà de la plus profonde mesure d'humidité du sol. Par contre pour un bilan annuel il est possible d'estimer les pertes par drainage.

7. VARIATIONS DU STOCK D'EAU DU SOL, ΔH (C. Huttel, 1972).

Méthodes. — Les mesures hebdomadaires d'humidité du sol ont été faites selon la méthode désormais classique, basée sur le ralentissement de neutrons rapides. L'appareillage et sa maintenance ont été fournis par le Laboratoire des Radio-Isotopes que le Commissariat à l'Energie Atomique a installé au Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé (1). Un humidimètre HP 110 (Source Ra-Bé de 5 m Ci) associé à un IP 110 furent utilisés jusqu'en décembre 1970 ; l'évolution du matériel nous a permis d'utiliser à partir de janvier 1971 un humidimètre HP 310 (Source Am-Bé de 50 m Ci) associé à une échelle de comptage EC 310 ou ECP 511. Les mesures sont faites dans des tubes en duraluminium de 2,50 m implantés verticalement dans le sol (5 tubes dans chaque station).

Le temps de comptage choisi est de 100 sec. On sait que pour des mesures périodiques à un point fixe les erreurs dues à l'appareillage sont négligeables si le temps de comptage dépasse 30 sec. (Hewlett et coll. 1964). Des essais préliminaires nous ont montré que la variance des mesures est encore fortement diminuée lorsque le temps de comptage passe de 30 à 100 sec. Ce gain de précision peut être appréciable dans le cas de faibles variations d'humidité du sol.

Les mesures sont faites à des profondeurs fixes et la distance verticale entre deux mesures est 10 cm jusqu'à 1,4 m de profondeur et 20 cm au-delà. La méthode ne donne pas une mesure ponctuelle, les neutrons diffusant dans une « sphère d'action » d'un rayon de 20 à 30 cm dans notre cas (Andrieux et coll. 1962). Dans nos mesures les « sphères d'action » se recouvrent largement. Dans un sol sableux des profils établis avec des mesures à des écarts variables, de 10 à 60 cm par exemple, donnent les

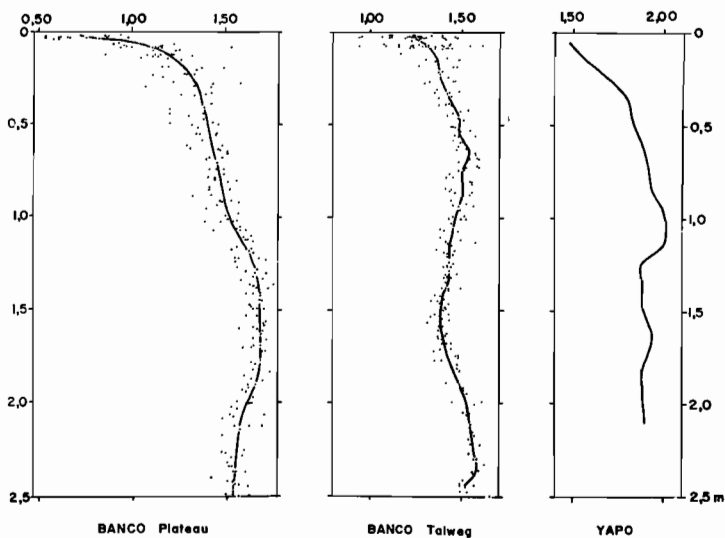


Figure 10. — Densités apparentes sèches en fonction de la profondeur.

(1) Nous remercions M. P. Marini de ses conseils pour l'implantation des points de mesure et pour le dépouillement des données, ainsi que MM. M. Gouyon et R. Blanc qui ont assuré l'entretien du matériel.

mêmes résultats, mais il n'en est pas de même dans les sols à texture plus fine (Gornat et Gildberg 1972). Pour pouvoir comparer les deux stations il a fallu adapter la technique au cas le plus défavorable, celui du sol argileux.

L'emploi d'un réflecteur neutronique (Moutonnet et coll. 1967) permet de faire la première mesure à une profondeur de 12 cm. Pour l'exploitation des résultats les mesures ont été regroupées en quatre tranches de sol d'épaisseur croissante avec la profondeur, 0 à 27, 27-67, 67-127 et 127-232 cm. Les mesures de terrain sont ramenées à des mesures d'une sonde théorique idéale comptant 1 000 impulsions par seconde dans l'eau. Cette correction est faite à l'aide d'une mesure hebdomadaire dans un fût rempli d'eau (correction par le point-eau).

L'étalonnage sur le terrain a été réalisé avec un minimum de matériel. On met en relation des comptages neutroniques avec l'humidité volumique des horizons que l'on obtient par mesure de l'humidité pondérale et de la densité apparente sèche du sol. L'humidité pondérale est obtenue sur des prélèvements de sols à la tarière ; par contre la densité apparente ne peut être obtenue que par pesée de volumes connus de terre. Au Banco il a été possible d'utiliser un densitomètre à membrane et des prélèvements ont été faits sur plusieurs profils dans des fosses (Fig. 10).

A Yapo la forte proportion d'éléments grossiers a nécessité l'emploi d'autres méthodes. La tarière employée par le laboratoire d'Agronomie

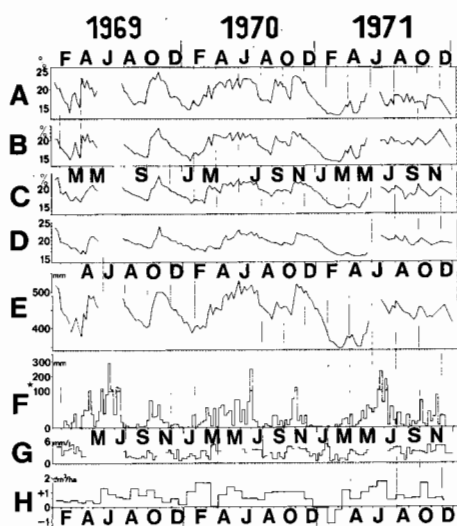


Figure 11. — Bilan hydrique hebdomadaire au Banco, station de plateau.

- A : Humidité volumique dans la tranche de sol 0- 27 cm de profondeur.
- B : Humidité volumique dans la tranche de sol 27- 67 cm de profondeur.
- C : Humidité volumique dans la tranche de sol 67-127 cm de profondeur.
- D : Humidité volumique dans la tranche de sol 127-232 cm de profondeur.
- E : Variations du stock d'eau du sol en mm.
- F : Précipitations en mm (* Changement d'échelle au-dessus de 100 mm).
- G : Evapotranspiration à partir du sol en mm/jour.
- H : Augmentation de surface terrière en dm^2 par ha et par période de trois semaines.

Les mesures sont hebdomadaires (sauf H).

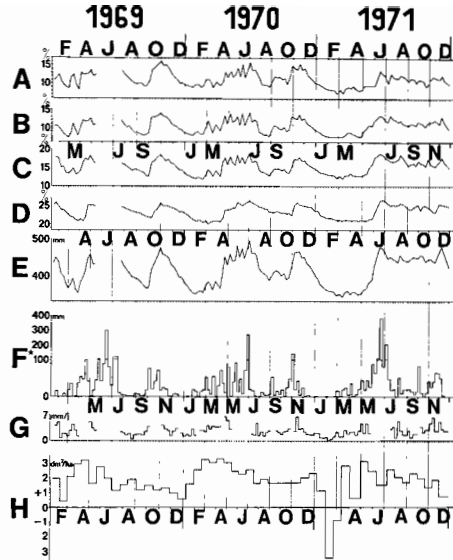


Figure 12. — Bilan hydrique hebdomadaire au Banco, station de talweg.
Même légende que figure 11.

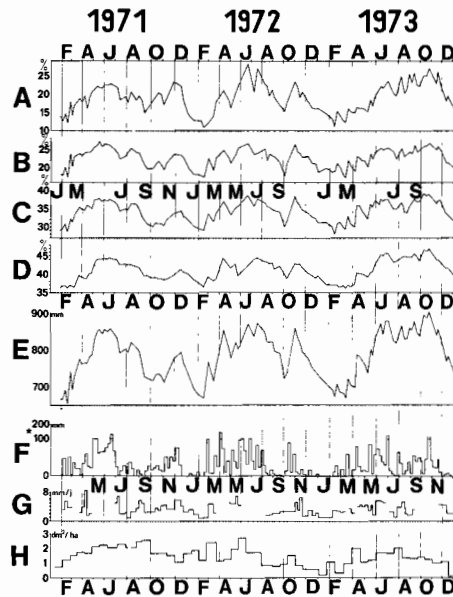


Figure 13. — Bilan hydrique hebdomadaire à Yapo.
Même légende que figure 11.

du Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé (Bonzon et Picard 1969) permet le prélèvement de sol en place dont on peut connaître le volume. On a ainsi mesuré les densités apparentes jusqu'à 1,30 m de profondeur sur 50 profils. Au-delà de cette profondeur, limite de la tarière, on a employé le densimètre à rayons gamma. Cet appareil de présentation extérieure semblable à celle de la sonde à neutrons, permet la mesure de la densité apparente des sols dans les tubes d'accès employés pour les mesures neutroniques.

Les résultats sont exprimés sur les figures 11, 12 et 13 A à D.

1°) *Variations verticales d'humidité.* — Le tableau IX donne les valeurs maximum et minimum du pourcentage volumique

TABLEAU IX

Valeurs extrêmes du profil d'humidité du sol, en humidité volumique H_v , et du stock total, en mm équivalents de précipitation.

HORIZON		BANCO		YAPO
		Plateau	Talweg	
0 - 27 cm	Maximum	16,1	24,9	28,2
	Minimum	7,5	14,8	10,9
	Hv % Différence	8,6	10,1	17,3
27 - 67 cm	Maximum	13,9	22,9	27,1
	Minimum	7,2	14,0	17,3
	Hv % Différence	6,7	8,9	9,8
67 - 127 cm	Maximum	18,5	23,4	39,0
	Minimum	11,8	14,4	27,9
	Hv % Différence	6,7	9,0	11,1
127 - 232 cm	Maximum	26,3	23,6	46,8
	Minimum	19,0	15,7	36,1
	Hv % Différence	7,3	7,9	10,7
Stock total	Maximum	495	543	902
	Minimum	341	243	655
	mm Différence	154	200	247

d'eau et les différences entre ces deux valeurs pour les sols des trois stations, qui expriment également les quantités d'eau en mm par 10 cm de sol. A la station de talweg du Banco, où la texture est homogène sur tout le profil, cette amplitude de variation décroît régulièrement avec la profondeur et n'est fonction que de l'activité des racines. A la station de plateau, la décroissance est masquée par l'augmentation de la teneur en argile avec la profondeur. A Yapo ce sont les gravillons qui perturbent ce schéma. Les horizons superficiels peuvent céder jusqu'à plus de la moitié de leur eau et dans les plus profonds cette fraction n'est plus que de l'ordre du tiers.

L'amortissement des variations avec la profondeur est bien visible sur les pentes des courbes de juillet à septembre 1969 au Banco et de décembre 1971 à février 1972 à Yapo. Cette atténuation peut aussi se produire en phase de réhumectation (mars 1969 au Banco, octobre-novembre 1971 à Yapo). On en trouvera également un exemple au Banco (avril-juillet 1970) où les variations en dents de scie s'estompent en profondeur. Mais elle n'est plus sensible en période de pluies intenses où tout le profil est rapidement rechargé en eau (octobre 1969, novembre 1970, avril 1971 au Banco, mars et octobre 1972 à Yapo).

2°) *Variations annuelles du stock d'eau du sol* (fig. 11 à 13, E). — Les variations sont cycliques avec deux minimums annuels ou un seul lorsque la petite saison sèche est peu marquée (1971 au Banco, 1973 à Yapo). La dernière ligne du tableau X donne les valeurs extrêmes du stock d'eau. Le maximum ainsi que les différences entre maximum et minimum sont liés à la teneur en éléments fins du sol (moyenne sur tout le profil). En effet le sol de talweg du Banco est un peu plus riche en argile que celui du plateau, mais plus pauvre que celui de Yapo.

8. *EVAPOTRANSPIRATION A PARTIR DU SOL* (fig. 11 à 13, G), ETR-I, — Les valeurs obtenues sont très fragmentaires. Elles varient entre 0,5 et 8,4 mm/jour. Les valeurs les plus élevées se rencontrent au début ou à la fin des saisons humides et les plus faibles en pleine saison sèche. Les moyennes calculées sur nos chiffres sont de 2,5 mm/jour au Banco et 3,2 mm/jour à Yapo. Il n'y a pas de différences entre les deux stations du Banco, mais les valeurs observées sont plus élevées à Yapo.

9. *BILAN HYDRIQUE ANNUEL*. — En complétant nos mesures par des observations météorologiques il est possible d'établir un bilan annuel pour la période d'étude. Les mesures des précipitations à découvert sont fournies par les postes météorologiques les plus proches (Ecole forestière du Banco et Azaguié). Pour les périodes où l'évapotranspiration n'est pas calculable dans nos stations on

l'a remplacée par l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Turc (1961). La concordance entre ces deux évapotranspirations est bonne en saison humide (Bernhard-Reversat, Huttel et Lemée 1972). Les paramètres astronomiques utilisés dans la formule de Turc ont été calculés par Gosse (1973) et les mesures des facteurs climatiques, température moyenne et durée d'insolation, sont empruntés aux postes météorologiques les plus proches : Adiopodoumé (O.R.S.T.O.M.) et Azaguié (I.F.A.C.) (voir le Chapitre I). Cette évapotranspiration calculée comprenant l'eau d'interception évaporée directement des cimes des arbres, il a fallu

TABLEAU X

*Eléments du bilan hydrique annuel, en mm,
et pourcentages (entre parenthèses).*

POSTES DU BILAN	BANCO 1969-1971		YAPO 1972 - 1973
	Plateau	Talweg	
(1) Précipitations à découvert	1 800 (100 %)	1 800 (100 %)	1 950 (100 %)
(2) Précipitations sous forêt	1 615 (90)	1 555 (86)	1 510 (77)
(3) Ecoulement le long des troncs	15 (1)	15 (1)	15 (1)
(4) Interception vraie	170 (10)	230 (12)	425 (22)
(1) — (2 + 3)			
(5) Eau évapotranspirée du sol	975 (54)	965 (54)	1 000 (51)
(6) Evapotranspiration réelle totale	1 145 (64)	1 195 (66)	1 425 (73)
(4) + (5)			
(7) Drainage	355 (36)	605 (34)	525 (27)
(1) — (6)			

faire une correction pour séparer l'eau évapotranspirée à partir du sol (ET) et l'interception (I). Le drainage est calculé par différence. On a négligé un des flux d'eau, le stockage d'eau dans la végétation par augmentation de la biomasse ; ce transfert peut être estimé à 0,3 mm/an. Le tableau X donne les moyennes de trois années de mesures au Banco et de deux années à Yapo. Le

drainage représente selon la station du quart au tiers des précipitations. Mais ces valeurs ne peuvent être considérées comme des moyennes représentatives : les trois années de mesure au Banco sont des années à faible pluviosité (moyenne sur 38 ans : 2 140 mm) et on peut espérer en année normale un drainage de l'ordre de 900 mm, soit 40 % des précipitations. Il est plus difficile d'estimer une moyenne représentative à Yapo. Les deux années de mesures furent très pluvieuses (moyenne sur 40 ans : 1 740 mm), mais elles furent aussi marquées par des durées d'insolation supérieure à la moyenne pendant la saison humide. On peut estimer que le drainage ne doit guère dépasser 550 mm, soit 30 % des précipitations.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEUX, C., BUSCARLET, L., GUITTON, J., MERITE, B. (1962). — Mesure en profondeur de la teneur en eau des sols par ralentissement des neutrons rapides. *Radioisotopes in soil-plant nutrition studies, Symp. AIEA Vienne*, 187-219.
- BERNHARD-REVERSAT, F., HUTTEL, Ch., LEMEE, G. (1972). — Quelques aspects de la périodicité écologique et saisonnière en forêt ombrophile sempervirente de Côte-d'Ivoire. In F.B. et P.M. Golley Eds., *Tropical Ecology with an emphasis on organic-production*, Athens, Georgia, pp. 217-234.
- BONZON, B., PICARD, D. (1969). — Matériel et méthodes pour l'étude de la croissance et du développement en pleine terre des systèmes racinaires. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Biol.*, 9 : 3-18.
- CZARNOWSKI, M.S., OLZEWSKI, J.L. (1968). — Rainfall interception by a forest canopy. *Oikos*, 19 : 345-350.
- DABRAL, B.G., RAO, B.K.S. (1969). — Interception studies in Sal (*Shorea robusta*) and Khair (*Acacia catechu*) plantations. *Indian Forester*, 95 : 314-323.
- FREISE, F. (1936). — Das Binnenklima von Urwäldern im subtropischen Brasilien. *Petermans Mitteilungen*, 82 : 301-307.
- GEIGER, R. (1961). — *Das Klima der bodennahen Luftschicht*, 4^e édition, F. Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- GORNAT, B., GOLDBERG, D. (1972). — The relation between moisture measurements with a neutron probe and soil texture. *Soil. Sci.*, 114 : 254-258.
- GOSSE, G. (1973). — *Calcul des paramètres astronomiques utilisés dans la formule de Turc pour différentes localités de Côte-d'Ivoire*. Rapport multigraphié. O.R.S.T.O.M. Adiopodoumé, 24 p.
- HEWLETT, J.D., DOUGLASS, J.E., CLUTTER, J.L. (1964). — Instrumental and soil moisture variance using the neutron scattering method. *Soil. Sci.*, 97 : 19-24.
- HOPKINS, B. (1965). — Vegetation of the Olokemeji Forest Reserve, Nigeria. III. The microclimate, with special reference to their seasonal changes. *J. Ecol.*, 53 : 125-138.
- HUTTEL, C. (1972). — Estimation du bilan hydrique dans une forêt sempervirente de basse Côte-d'Ivoire. *Radioisotopes in soil-plant nutrition studies, Symp. AIEA, Vienne*, 1971.
- KLINE, J.R., JORDAN, C.F. (1968). — Tritium movement in soil of tropical rain forest (Puerto-Rico). *Science*, 160 : 550-551.
- MCCOLL, J.G. (1970). — Properties of some natural waters in a tropical wet forest of Costa-Rica. *BioScience*, 20 : 1096-1100.

- McGINNIS, J.T., GOLLEY, F.B., CLEMENTS, R.G., CHILD, G.I., DUEVER, M.J. (1969). — Elemental and hydrologie budgets of the Panamian tropical moist Forest. *BioScience*, 19 : 697-700.
- MOUTONNET, P., BUSCARLET, L.A., MARCESSE, J. (1967). — Emploi d'un humidimètre à neutrons de profondeur associé à un réflecteur pour la mesure de la teneur en eau des sols au voisinage de la surface. *Ann. I.T.B.T.P.*, 233 : 1-5.
- NYE, P.H. (1961). — Organic matter and nutrients cycles under moist tropical Forest. *Plant and Soil*, 13 : 333-346.
- ODUM, H.T., MORE, A.M., BURNS, L.A. (1970). — Hydrogen budget and compartments in the rain forest. In : Odum, H.T. (Ed.), *A tropical rain Forest*, USAEC, H 105 - H 122.
- OVINGTON, J.D. (1954). — A comparison of rainfall in different woodlands. *Forestry*, 27 : 41-53.
- ROOSE, E.J. (1967). — Quelques exemples des effets de l'érosion hydrique sur les cultures. *C.R. Coll. Fertilité des sols*, Tananarive, II, 1385.
- ROOSE, E.J., HENRY DES TURREAUX, P. (1970). — Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans un sol en place. *Agr. Trop.*, 25 : 1079-1087.
- SOLLINGS, P., DREWRY, G. (1970). — Electrical conductivity and flow rate of water through the forest canopy. In Odum, H.T. (Ed.), *A tropical rain Forest*, USAEC, H 137 - H 153.
- TURC, L. (1961). — Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales agr. INRA*, 12 : 13-49.
- ULLAH, W., JAISWAL, S.D., RAWAT, U.S. (1970). — Accuracy of rainfall sampling in forest clearings. *Indian Forester*, 96 : 195-202.