

Evapotranspiration réelle de la forêt amazonienne en Guyane

Michel-Alain ROCHE
Maître de Recherches principal, ORSTOM

ABSTRACT : *Actual evapotranspiration of amazonian forest in french Guyana*

The actual evapotranspiration of the wet tropical forest in french Guyana, under an annual rainfall ranging from 2 000 mm to 4 000 mm, is calculated by the hydrology balance method, from nine catchments monitored during 26 or 9 years. The pluriannual value amounts 1 530 mm, with respective deviation of each basin, not higher than $\pm 7\%$. The so calculated ETA is in accordance, with deviation lower than 4%, with the one computed by THORNTHWAITE's method.

The rain interception by forest cover is also measured. It represents 15% of the total precipitation and about 30% of the ETA. The soil evaporation is evaluated to 2,5% of rainfall and 5% of ETA, from measurements carried out on the under forest pan. Therefore the transpiration should represent 65% of ETA.

The ETA values in Guyanan forest are similar, or higher to a maximum of 20%, to the one measured in congolese forest.

RÉSUMÉ

L'évapotranspiration réelle de la forêt tropicale humide en Guyane, sous une pluviométrie de 2 000 à 4 000 mm, est mesurée par la méthode du bilan hydrologique, sur neuf bassins versants observés durant 26 ou 9 neuf années. La valeur pluriannuelle est de 1 530 mm, avec des écarts propres à chaque bassin ne dépassant pas $\pm 7\%$. L'ETR ainsi mesurée concorde, avec des écarts inférieurs à 4%, avec celle qui est calculée par la méthode de THORNTHWAITE.

L'interception de la pluie par la voûte forestière a été également mesurée. Elle représente 15% de la pluviométrie brute et environ 30% de l'ETR. L'évaporation du sol est évaluée à 2,5% de la pluviométrie et 5% de l'ETR, d'après des mesures effectuées en bac sous forêt. La transpiration assurerait ainsi 65% de l'ETR.

Les valeurs de l'ETR de la forêt en Guyane sont analogues ou supérieures, de 20% au maximum, à celles qui ont été mesurées en forêt congolaise.

SOMMAIRE

1. Introduction
2. Déficit d'écoulement et évapotranspiration réelle
3. Données pluvio-hydrométriques
4. Valeurs de l'ETR de la forêt en Guyane
 - 4.1. Valeurs obtenues par le bilan hydrologique
 - 4.2. Comparaison avec les valeurs calculées par les formules de Penman et de Thornthwaite
5. Evaluation des diverses composantes de l'évapotranspiration réelle
6. Comparaison avec l'ETR mesurée en d'autres régions
7. Conclusion
8. Bibliographie

L'évapotranspiration réelle de la forêt tropicale humide a pu être mesurée en Guyane par l'établissement du bilan hydrologique pluriannuel de bassins versants, de 10 000 à 0,3 km², totalement couverts par ce type de végétation. Les valeurs obtenues sont comparées aux évapotranspirations réelle et potentielle calculées par formules ainsi qu'aux valeurs obtenues en Afrique, notamment dans le bassin du Congo.

Le bilan hydrique d'un bassin peut s'écrire

$$DE = ETR + Hs \pm \Delta R = P - He$$

DE est le déficit d'écoulement,

ETR l'évapotranspiration réelle qui inclut la transpiration des végétaux ainsi que l'évaporation sur les branches et le feuillage après l'interception de la pluie,

Hs les pertes, ou les alimentations souterraines, en relation avec les nappes des bassins adjacents,

ΔR la variation des réserves d'eaux souterraines, dont les résurgences dans le bassin contribuent à l'écoulement superficiel,

P la pluviométrie,

He l'écoulement superficiel à l'exutoire du bassin.

Le bilan hydrologique a été établi sur la base des données homogénéisées, pour cinq bassins de 4 800 à 10 000 km², sur la période 1956-1976, et pour trois bassins représentatifs de 12,4 à 0,3 km² à Grégoire sur la période 1968-1976 (tableau I).

La localisation de ces bassins est indiquée sur la carte d'isohyètes pluriannuelles (fig. 1).

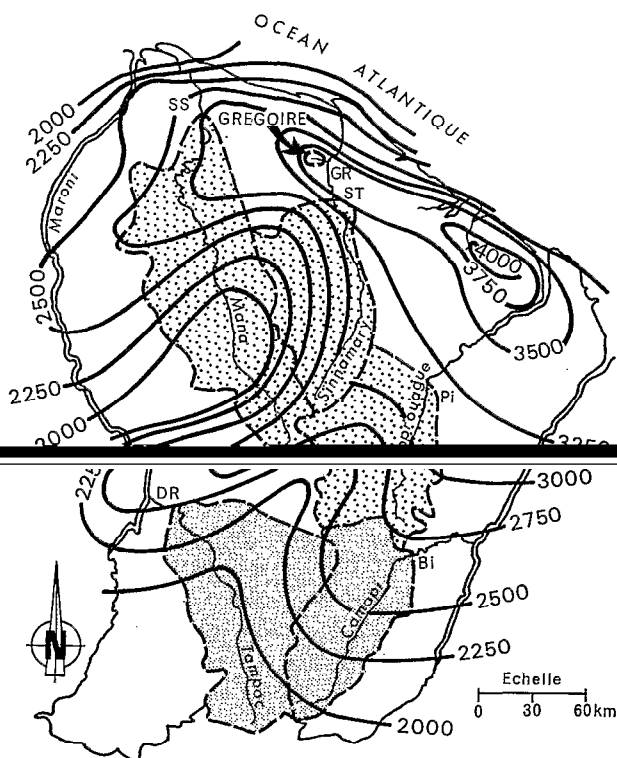


Fig. 1. — Pluviométrie moyenne annuelle (mm) en Guyane durant la période 1956-1976 (d'après Atlas de Guyane)
Situation des bassins versants

2. DÉFICIT D'ÉCOULEMENT ET ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE

L'assimilation de l'ETR au déficit d'écoulement nécessite que les termes H_s et ΔR puissent être négligés devant P et H_e .

En ce qui concerne les bassins en cause, cette condition peut elle être acceptée pour le terme H_s , qui représente les échanges souterrains avec les bassins adjacents ou un inféro-flux sous l'exutoire ?

Leur structure hydrogéologique, considérée à l'échelle de plusieurs kilomètres carrés, est relativement simple. Ils sont établis sur des roches antécambriennes éruptives (granites, roches vertes) ou très métamorphisées (migmatites à schistes) qui constituent le bouclier guyanais. Une altération intense y a créé des sols ferrallitiques, argilo-sableux, épais de plusieurs mètres, pour lesquels sont distingués deux principaux systèmes de circulation hydrique : l'un à drainage latéral oblique, la présence d'un horizon pédologique peu profond et de faible perméabilité bloquant plus ou moins la percolation, l'autre à drainage vertical, libre sur une plus grande profondeur (R. Boulet - 1977, F. X. Humbel - 1978, E. Fritsch - 1979).

Ces deux types de drainage engendrent une phase de tarissement de l'écoulement superficiel à composantes multiples. Un tarissement rapide, de l'ordre de quelques jours, pour lequel se distinguent souvent des composantes secondaires, marque la contribution importante du drainage oblique d'un ou plusieurs horizons pédologiques peu profonds. Il est relayé par un tarissement plus lent, essentiellement assuré par la vidange de terrains altérés plus homogènes et profonds, lorsque ceux-ci bien sûr sont entaillés par le thalweg.

Dans de telles conditions d'altération, il est probable que les lignes de crête de la topographie ne correspondent pas toujours exactement avec celles du mur de la nappe (horizon imperméable ou socle sain), déterminant ainsi un bassin versant souterrain différent du bassin superficiel.

Toutefois, dans le cas où des échanges souterrains peuvent se produire alors avec les bassins voisins, ce type de structure hydrogéologique et les faibles transmissivités ne peuvent donner lieu qu'à des débits relativement faibles par rapport à l'apport propre du bassin. Par ailleurs, pertes et apports, dès lors que le périmètre du bassin s'accroît, tendent à se compenser. Une réserve peut cependant être faite sur ce dernier point pour le bassin Grégoire III, compte tenu de ses petites dimensions.

L'inféro-flux sous les stations de mesure d'écoulement est nul car celles-ci sont installées sur des seuils rocheux inaltérés.

Ainsi, le terme H_s paraît pouvoir être négligé pour ces bassins de Guyane.

La variation des réserves souterraines, représentée par le terme $\pm \Delta R$ peut être considérée comme voisine de zéro, car la pluviométrie et les caractéristiques de la phase de tarissement étaient presque analogues à la fin des années limitant les périodes sur lesquelles les bilans ont été établis. D'ailleurs, une différence entre l'état de ces réserves d'eau dans les sols tend à devenir négligeable devant P et H_e compte tenu de la durée de ces périodes (21 à 9 ans).

Il ressort que les conditions hydrogéologiques des bassins étudiés sont particulièrement favorables pour permettre d'assimiler, avec une marge d'erreur faible, l'évapotranspiration au déficit d'écoulement, et écrire :

$$ETR = P - H_e$$

3. DONNÉES HYDROMÉTRIQUES

La pluviométrie moyenne sur les grands bassins, pour la période 1956-1976, a été évaluée par planimétrie de la carte d'isohyètes présentée dans l'Atlas de la Guyane (1979). Il faut mentionner que le nombre restreint des postes de mesure, notamment dans la moitié méridionale du pays, est à l'origine d'une incertitude dans le tracé des isohyètes et par conséquent dans l'évaluation de la pluviométrie moyenne.

A Grégoire, ce terme a été calculé par la méthode de Thiessen, d'après les observations journalières effectuées sur un réseau composé de 2 à 16 pluviographes selon les bassins (M. A. Roche, 1979).

Les écoulements superficiels ont été mesurés par l'enregistrement continu des hauteurs d'eau à des stations où les relations hauteurs-débits ont été établies par des séries de jaugeages (M. A. Roche, 1979).

Les résultats pluvio-hydrométriques sont regroupés dans le tableau I.

TABLEAU I

CARACTÉRISTIQUES HYDROPLUVIOMÉTRIQUES ET DÉFICIT D'ÉCOULEMENT DE BASSINS VERSANTS
SOUS FORÊT TROPICALE HUMIDE EN GUYANE

Bassins versants	Période	Superficie (km ²)	Altitude moyenne approximative (m)	P moy (mm)	He (mm)	DE (mm)	Ke (%)	K DE (%)
La Mana à Saut Sabbat	1956-1976	10 300	100	2 473	934	1 539	37,8	62,2
La Sinnamary à Saut Tigre	1956-1976	5 720	100	2 777	1 273	1 504	45,8	54,2
L'Oyapock à Pierrette	1956-1976	6 200	200	2 801	1 164	1 637	41,6	58,4
Le Camopi à Bienvenue	1956-1976	4 810	250	2 436	913	1 523	37,5	62,5
Le Tampoc à Degrad Roche	1956-1976	7 650	250	2 125	706	1 419	33,2	66,8
Grégoire à Station I	1968-1976	8,4	90	3 676	2 148	1 528	58,4	41,6
Grégoire à Station II	1968-1976	12,4	50	3 697	2 260	1 437	61,1	38,9
Grégoire à Station III	1968-1976	0,32	40	3 751	2 307	1 444	61,5	38,5

4. VALEURS DE L'ETR DE LA FORÊT EN GUYANE

4.1. VALEURS OBTENUES PAR LE BILAN HYDROLOGIQUE

Les valeurs de l'ETR pluriannuelle déduites du bilan hydrologique sur la base des données précédentes varient de 1 640 mm à 1 420 mm selon les bassins, pour une pluviométrie pluriannuelle comprise entre 3 750 mm et 2 125 mm (tableau I). Toutefois, il ne ressort pas de corrélation entre l'ETR et la pluviométrie.

L'ETR de la zone nord, regroupant trois bassins (fig. 1), est de 1 560 mm pour une pluviométrie de 2 650 mm.

Celle de la zone sud, comprenant deux bassins, est de 1 460 mm pour une pluviométrie de 2 250 mm.

Sur les bassins de Grégoire, les valeurs sont comprises entre 1 435 et 1 530 mm.

4.2. COMPARAISON AVEC LES VALEURS CALCULÉES SELON PENMAN ET THORNTHTWAITE

L'évapotranspiration potentielle ETP calculée par la formule de Penman, sur la période 1969-1972, est de 1 565 mm à Grégoire, valeur légèrement supérieure à l'ETR de 1 440 à 1 530 mm mesurée par le bilan hydrologique des bassins de 1968 à 1976.

à l'ETP lorsque la terre est suffisamment humide, et que par ailleurs le sol est capable d'emmagasiner 100 mm d'eau restituable aux végétaux, le reste s'évaporant. Ainsi, le sol peut au cours des mois déficitaires subvenir pendant un certain temps aux besoins des plantes. Après épuisement de la réserve d'eau utile du sol, représentée par les 100 mm, la plante peut encore supporter un déficit mais son évapotranspiration réelle est inférieure à l'ETP.

Calculées pour 8 stations de Guyane, les valeurs de l'ETP varient de 1 630 mm à 1 470 mm selon les stations, et celles de l'ETR de 1 590 mm à 1 410 mm. Ces différences minimales entre l'ETR et l'ETP s'expliquent par le régime des précipitations en Guyane où des périodes de plusieurs semaines sans pluies sont rares.

La carte en courbes d'égales ETR (fig. 2) que la méthode de Thornthwaite permet de tracer, offre le moyen d'évaluer par planimétrie une valeur calculée de l'ETR des bassins étudiés (tableau ci-après).

	ETR Bilan	ETR Thorn.	ETP Penm.
Grégoire	1 470	1 500	1 565
Bassins nord	1 560	1 515	—
Bassins sud	1 460	1 400	—

La comparaison des valeurs obtenues par les différentes méthodes d'évaluation peut ainsi être effectuée, en tenant compte cependant que la multiplicité des périodes prises en considération peut engendrer une part des écarts constatés.

Quoi qu'il en soit ces écarts, ne dépassant pas 2 à 4%, apparaissent faibles. La cohérence des résultats d'ETR obtenus par le bilan hydrologique et la méthode de Thornthwaite permet d'avaliser la carte de H. Madec.

Ces résultats justifient également la mention de l'ETP mensuelle, telle qu'elle ressort des calculs effectués avec la formule de Penman pour la station de Grégoire (1968-1972), et des ETP et ETR calculées selon la méthode de Thornthwaite, pour la station de Rochambeau (1956-1960).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
Grégoire													
ETP Penman (mm)	101	110	126	125	108	105	120	145	160	160	155	150	1 565
(%)	6,5	7,0	8,1	8,0	6,9	6,7	7,7	9,3	10,2	10,2	9,9	9,6	100
Rochambeau													
ETP Thorn. (mm)	123	112	129	129	134	129	130	137	133	137	129	128	1 549
(%)	7,9	7,2	8,3	8,3	8,7	8,3	8,4	8,8	8,6	8,8	8,3	8,3	100
ETR Thorn. (mm)	123	112	129	129	134	129	130	137	129	64	129	128	1 473
(%)	8,4	7,6	8,8	8,8	9,1	8,8	8,8	9,3	8,8	4,3	8,8	8,8	100

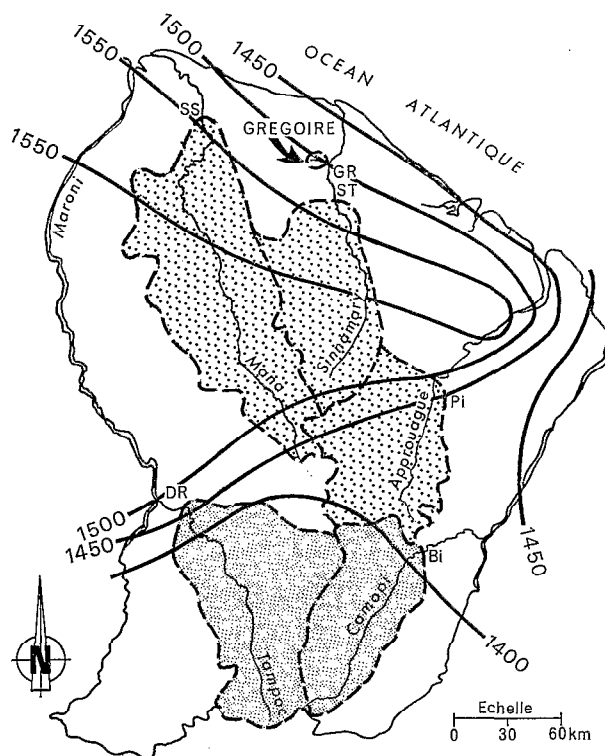


Fig. 2. — Evapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm) en Guyane, estimée selon la méthode de Thornthwaite sur la période 1956-1960, d'après H. MADEC, 1963

5. EVALUATIONS DES DIVERSES COMPOSANTES DE L'ETR

L'évapotranspiration globale, telle qu'elle est mesurée par le bilan hydrologique, est constituée d'un ensemble de phénomènes parmi lesquels peuvent être distinguées principalement la transpiration hydrique des végétaux, l'interception des averses par le feuillage et les branches (dont une partie est évaporée, l'autre partie étant probablement absorbée puis transpirée), l'évaporation du sol et de sa litière.

L'interception de la pluie par la voûte forestière a été mesurée à Grégoire en 1974-1975, à trois stations de 13, 13 et 6 pluviomètres groupées autour d'une clairière artificielle où étaient effectuées des observations climatologiques. L'interception durant une année y a arrêté respectivement 23%, 14% et 2% des précipitations, la valeur globale de l'interception, 470 mm, représentant 15% des 3 060 mm de pluie tombés dans la clairière et 30% de l'ETR. L'écoulement le long des troncs a été estimé inférieur à 1% de la pluie. Il est à signaler que les surfaces basales des troncs d'arbres d'un diamètre supérieur à 1 cm représentent dans la forêt guyanaise de 0,3 à 0,5% de la superficie totale (J. P. Lescure, communication personnelle).

Par ailleurs, durant la même période, deux bacs placés sous forêt, l'un de classe A, l'autre enterré, à section carrée de 1 m², ont évaporé respectivement 74 mm et 67 mm soit 2,5% de la pluviométrie annuelle ou 4,5% de l'évapotranspiration globale. Cette évaporation peut, en première approximation, représenter celle du sol et de sa litière.

Il est à signaler que les bacs de mêmes caractéristiques que les précédents, mais situés en clairière, ont évaporé respectivement 810 mm et 769 mm durant la même période. Ces valeurs, qui équivalent à la moitié environ de l'ETR, montrent que les phénomènes évaporatoires en clairière ne sont guère représentatifs de ceux qui interviennent au niveau de la voûte forestière.

6. COMPARAISON AVEC L'ETR MESURÉE EN D'AUTRES RÉGIONS

Dans d'autres conditions naturelles favorables, les bilans hydrologiques pluriannuels, établis pour de vastes superficies, ont fourni des valeurs de l'ETR parmi lesquelles il est intéressant de situer celles de la forêt guyanaise.

Le bilan hydrologique du lac Tchad (profondeur 1 à 4 m, superficie 20 000 km²), établi sur la période 1954-1969, a permis d'estimer une valeur globale des pertes hydriques tandis que le bilan salin, rendant possible la détermination des parts relatives de l'infiltration et de l'évaporation, a conduit à attribuer à cette dernière une valeur égale ou supérieure à 2 200 mm, sous une pluviométrie de 325 mm (M. A. Roche - 1973).

Les déficits d'écoulement de bassins versants de régime équatorial du sud de la Côte d'Ivoire, du sud du Cameroun, de l'extrême nord et du Moyen Congo sont compris entre 700 et 1 450 mm (J. Rodier, 1964, P. Dubreuil, 1972). Toutefois ces bassins, moins arrosés que la forêt guyanaise, peuvent être en partie couverts de savane dont l'évapotranspiration réelle est plus faible que celle de la forêt, ou situés à des altitudes très supérieures à celles des bassins guyanais.

L'ETR de la forêt équatoriale congolaise a été estimée par le bilan hydrologique à $1\,395 \pm 140$ mm par E. A. Bernard (1953). Plus tard, Bultot (1968), par la même méthode, aboutit pour la cuvette centrale du bassin congolais à une valeur de 1 280 mm, sous une pluviométrie de l'ordre de 2 000 mm. D'autre part, A. Focan et J. J. Fripiat (1953) mesurent une ETR de 1 433 mm pour la forêt de Yangambi, au Zaïre, dont 1 066 mm transpirés et 367 mm interceptés (26% de l'ETR).

L'ETR de la forêt congolaise apparaît ainsi analogue ou inférieure, au maximum de 20%, aux valeurs obtenues en Guyane.

Dans les îles Loyauté, l'interception par la forêt tropicale humide mesurée durant deux ans représente 295 mm, soit 22% des 1 500 mm de pluie (G. Girard, 1974).

De nombreuses mesures de ce type ont été effectuées en Europe et dans l'est des Etats-Unis (dont W. E. Sopper et H. W. Lull, 1967, G. Schnock, 1971, A. A. Molchanov, 1971, P. Duvigneaud, 1974). L'ETR mesurée par le bilan hydrologique varie entre 580 et 380 mm; l'interception représente le plus fréquemment de 15 à 20% des précipitations, dépassant parfois 30% (J. O. Helvey, J. H. Patric, 1965). La transpiration, variant entre 350 et 230 mm

7. CONCLUSION

L'évapotranspiration pluriannuelle de la forêt tropicale humide en Guyane, déduite de bilans hydrologiques, est comprise entre 1 640 mm et 1 420 mm, avec une moyenne de $1\,530 \text{ mm} \pm 7\%$, sous une pluviométrie de 2 000 mm à 4 000 mm. Il est distingué des valeurs de 1 560 mm pour un groupe nord de bassins (22 000 km²) et de 1 460 mm pour un groupe sud (12 460 km²), soit pour l'ensemble $1\,525 \pm 8\%$. L'ETR mesurée sur les bassins de Grégoire est estimée à $1\,470 \pm 4\%$. Ces valeurs sont légèrement supérieures, de 2 à 4%, à celles de l'ETR calculées, pour les mêmes zones, par la méthode de Thornthwaite.

L'interception de la pluie par la voûte forestière représente 30% de cette évapotranspiration, l'évaporation du sol environ 5%. Ainsi, la transpiration hydrique des arbres assurerait pour sa part 65% de l'ETR.

Les valeurs de l'ETR de la forêt guyanaise sont analogues, ou supérieures au maximum de 20%, à celles de la forêt congolaise. Cet écart pouvant être imputable aux différences climatiques entre les deux régions. La part revenant à la transpiration, 800 mm à 1 000 mm, est voisine de celle qui a été mesurée pour la forêt congolaise (1 000 mm).

L'évapotranspiration de la forêt tropicale apparaît ainsi trois à quatre fois plus élevée que celle des forêts de la zone tempérée.

8. BIBLIOGRAPHIE

Atlas de la Guyane - 1979.

AUBREVILLE (A.) - 1971 - Quelques réflexions sur les abus auxquels peuvent conduire les formules d'évapotranspiration réelle ou potentielle en matière de sylviculture et de bioclimatologie tropicale. *Bois et Forêt des Tropiques*, n° 136, p. 32-34.

BERNARD (E. A.) - 1945 - Le climat écologique de la cuvette centrale congolaise. *INEAC*, Bruxelles.

BOULET (R.) - 1971 - Aperçu sur le milieu pédo-écologique guyanais - Caractères originaux et conséquences sur la mise en valeur. Sect. Pédol. ORSTOM, cote P 149, 36 p.

BOULET (R.), FRITSCH (E.), HUMBEL (F. X.) - 1978 - Méthode d'étude et de représentation des couvertures pédo-écologiques de Guyane Française. Sect. Pédol. ORSTOM, 23 p.

BULTOT (F.) - 1961 - Sur la détermination des moyennes mensuelles et annuelles de l'évaporation réelle et de l'écoulement dans le bassin congolais. *INEAC*, Bruxelles, p. 816-838, 4 fig.

DEACON (E. L.), PRIESTLEY (C. H. B.), SWINBANK (W. C.) - 1958 - Evaporation et bilan hydrique. *Climatologie*. compte rendu de recherches UNESCO.

DUBREUIL (P.) - 1972 - Recueil des données de base de bassins représentatifs et expérimentaux, 1951-1969. *ORSTOM*, 916 p.

DUVIGNEAUD (P.) - 1974 - La synthèse écologique. *Dion*.

FOCAN (A.), FRIPIAT (J. J.) - 1953 - Une année d'observation de l'humidité du sol à Yangambi. *Bull. Sec. Inst. Roy. G1. Belge*.

FOUCEROUZE (J.) - 1966 - Quelques problèmes de bioclimatologie en Guyane Française. *L'agronomie tropicale*, n° 3, p. 292-346.

GIRARD (G.) - 1974 - Etude de l'interception par la forêt aux îles Loyauté. Sect. Hydrol. ORSTOM, 9 p.

HELVEY (J. D.), PATRIC (J. H.) - 1965 - Canopy and Litter Interception of Rainfall by Hardwoods of Eastern United States. *Water Resources Research*, 1, 2, p. 193-206.

HIEZ (G.), DUBREUIL (P.) - 1963 - Les régimes hydrologiques de Guyane Française. Mémoire ORSTOM, 119 p.

HUMBEL (F. X.) - 1978 - Caractérisation, par des mesures physiques, hydrique et d'enracinement, des sols de Guyane Française à dynamique de l'eau superficielle. *Sc. du sol.*, n° 2, p. 83-94.

- MOLCHANOV (A. A.) – 1971 – Cycles of atmospheric precipitation in different types of forests of natural zones of the USSR. Actes coll. Productivité des écosystèmes forestiers, UNESCO, 1969, Bruxelles, p. 49-68.
- OBERLIN (G.) – 1978 – L'ETR en hydrologie. XV journées de l'Hydraulique.
- PENMAN (H. L.) – 1948 – Natural evaporation from open water, bare soils, and grass. *Proc. roy. Soc. London. A* 193. Productivité des écosystèmes forestiers – 1971 – Actes. Coll. Bruxelles, UNESCO, Paris.
- RIOU (C.) – 1974 – La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Thèse doct. ès-sc., Paris, Mémoires ORSTOM, n° 80, 236 p.
- ROCHE (M. A.) – 1973 – Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Thèse doct. ès-sc., Paris VI, ORSTOM, 398 p., 131 fig.
- ROCHE (M. A.) – 1979 – Le réseau hydrométrique de Guyane (1951-1978). Sect. Hydrol. ORSTOM, Cayenne, 104 p., 25 fig.
- ROCHE (M. A.) – 1980 – Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier tropical humide à Ecérex, en Guyane. Sect. Hydrol. ORSTOM, 51 p., 13 fig.
- RODIER (J.) – 1964 – Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'est du Congo. ORSTOM, Paris, 137 p.
- SCHNOCK (G.) – 1971 – Le bilan de l'eau dans l'écosystème forêt. Application à une chênaie mélangée de haute Belgique. Actes Coll. Productivité des écosystèmes forestiers, UNESCO, 1969, Bruxelles, p. 41-47, 2 fig.
- SOLLINS (P.), DREWRY (G.) – 1970 – Electrical Conductivity and Flow Rate of Water Through the Forest Canopy. A Tropical Rain Forest. U.S. Atomic Energy Commission, III, p. 137-153.
- SOPPER (W. E.), LUL (H. W.) – 1967 – International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon Press., 813 p.
- THORNTHWAITTE (C. W.) – 1945 – The Water Balance of Tropical Climates. *Bull. Amer. Météorol. Soc.*, 32, p. 116-173.