

Le fleuve Ogooué au Gabon

*Reconstitution des débits manquants
et mise en évidence de variations climatiques
à l'équateur*

Gil MAHÉ (1), Jacques LERIQUE (1) et Jean-Claude OLIVRY (2)

RÉSUMÉ

L'Ogooué est un fleuve équatorial gabonais à deux crues d'automne et de printemps dont le suivi permet l'étude des variations d'activité du flux de mousson atlantique. Les débits manquants sont reconstitués à partir de relations pluies-débits mises au point par une méthode graphique dérivée de la méthode des déviations résiduelles. L'analyse des débits mensuels de l'Ogooué à Lambaréné depuis 1930 met en évidence les variations et tendances climatiques interannuelles, et témoigne de la modification du régime de la saison des pluies australe. Les débits de printemps diminuent depuis le milieu de la décennie 1960 et les maximums journaliers et mensuels se produisent plus tôt par rapport au début de la série. Cependant, les crues de fin d'année ne suivent pas de tendance continue à la baisse. L'étude des débits à trois stations de l'intérieur du bassin-versant apporte des indications sur l'élaboration du régime à Lambaréné, et met l'accent sur la complexité du régime hydrologique de l'Ogooué.

MOTS-CLÉS: Gabon — Ogooué — Relations pluies-débits — Flux de mousson — Crues — Variations climatiques.

ABSTRACT

THE OGOOUÉ RIVER (GABON), DISCHARGE RECONSTRUCTION AND EVIDENCE OF EQUATORIAL CLIMATIC VARIATIONS.

The Ogooué River flows through Gabon under an equatorial climate. The variations of the Atlantic monsoon flow can be studied by the two floods occurring in autumn and spring. Missing monthly discharge values are recovered by rainfall-runoff relations based on the residual-variations graphic method. The study of the monthly discharges of the Ogooué River at the Lambaréné station since 1930, shows interannual climatic trends and variations. It reveals a modification of the southern rainy season since the middle of the sixties. Spring (North hemisphere) discharges decrease and daily and monthly peak flows occur sooner than during the 1930-1960 period. During the same period autumn discharges do not change significantly. Monthly discharges at three hydrometric stations situated in different morpho-climatological areas within the basin are also studied, and give information about Lambaréné regime components. Study of runoff coefficients shows that in the southern parts of the basin floods are largely regulated by underground formations, which is not the case in the northern part where flow variations are therefore more representative of rainfall fluctuations. This work emphasizes the complexity of the Ogooué regime, which is somewhat unexpected considering both the rather flat landscape covered by equatorial forest and the regular and abundant rainfall.

KEY WORDS: Gabon — Ogooué — Rainfall-runoff relations — Monsoon flow — Floods — Climate variations.

1. INTRODUCTION

Au cours de ces dernières décennies, les variations climatiques ont entraîné en Afrique de graves problèmes d'économie de l'eau dans les régions, principalement soudano-sahéliennes, où durant la plus grande partie de l'année les précipitations sont inférieures à la demande évaporatoire (ETP). La majorité des études hydro-climatologiques a été focalisée vers ces lieux où la baisse de la pluviosité a engendré un état de sécheresse prolongé. En Afrique Centrale, du

(1) Hydrologues ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 01.

(2) Hydrologue, Centre ORSTOM, BP 2528, Bamako, Mali.

Cameroun sud au Zaïre, la baisse de pluviosité, bien que durablement ressentie dans les totaux annuels de précipitations (LERIQUE, à paraître), n'affecte que peu le quotidien et est de ce fait moins spectaculaire qu'au Sahel.

Si les débits ont effectivement diminué en moyenne entre 1970 et 1985 (MAHÉ, 1987), la diminution de pluviosité y est plus modérée (MAHÉ, à paraître), et les sécheresses de 1972-73 et 1982-83, n'ont pas eu de graves conséquences à long terme. Cela est dû principalement à la grande quantité de précipitations qui dépasse durant la majeure partie de l'année la demande en ETP (cette dernière étant réduite par le couvert forestier).

Cependant, idéalement placé à la charnière des influences boréales et australes, le Gabon est un lieu privilégié pour l'étude des variations d'activité de la mousson atlantique, à travers l'évolution comparée des deux maximums de crue. Le bassin-versant de l'Ogooué est traversé deux fois par an par la structure centrale pluvio-gène du flux de mousson. A Lambaréné, près de l'exutoire, deux crues témoignent de ce passage en automne et au printemps, correspondant respectivement aux saisons des pluies de l'hémisphère nord et sud. L'apport d'eau douce de l'Ogooué au golfe de Guinée se situe au 3^e rang après ceux du Congo et du Niger.

La chronique des débits de l'Ogooué à Lambaréné remonte à 1929, avec malheureusement une lacune continue de 1950 à 1953, et s'arrête en août 1983. Compte tenu de la longue série de mesures déjà existantes, et de l'importance que revêt l'étude de ce fleuve, il a semblé utile de reconstituer les débits manquants et d'extrapoler les débits récents, en grande partie par l'utilisation d'une méthode de corrélation graphique pluie-débit, dérivée de la méthode des déviations résiduelles.

2. LE CLIMAT ÉQUATORIAL GABONAIS

2.1. GÉNÉRALITÉS

Le Gabon, positionné entre les parallèles 2°20'N et 4°S a un climat de type équatorial chaud et humide à deux saisons des pluies et deux saisons sèches alternées. Du nord au sud la variation est progressive et continue. D'équatorial à tendance boréale à la frontière camerounaise (la crue d'automne est plus importante que la crue de printemps), la tendance australe s'affirme de plus en plus en se dirigeant vers le sud où elle devient prépondérante avec une seule saison sèche bien marquée de juin à septembre. Cette variation est due essentiellement à la position géographique du territoire par rapport à l'équateur thermique et aux centres d'action qui régissent les mouvements saisonniers d'air de part et d'autre des basses pressions équatoriales. Les précipitations sont principalement liées à la pénétration du flux de mousson atlantique. Mais dans le sud-est du pays l'interférence d'air humide de l'océan indien peut provoquer des orages.

2.2. LES SAISONS

La répartition annuelle des pluies est l'élément caractéristique de la définition des saisons dans la zone intertropicale.

La grande saison sèche équatoriale en juillet-août dure environ deux mois dans le nord du pays (Bitam, Mékambo) et augmente progressivement vers le sud pour atteindre près de quatre mois entre juin et septembre. À partir de septembre le flux de mousson pénètre au Gabon par le nord, où les précipitations sont maximales en octobre (250 à plus de 600 mm), et atteint le sud en octobre, où les maximums sont observés en novembre (200 à 400 mm). Cette séquence pluvieuse constitue ce qui est appelé la grande saison des pluies. Durant la petite saison sèche, en janvier et février, les précipitations diminuent jusqu'à 50 à 200 mm par mois du nord au sud. De fin février à mai la zone active du flux de mousson traverse le pays, renforcée très souvent par la pénétration par l'est des masses d'air humides de l'océan indien. C'est la seconde saison des pluies, dispensatrice de précipitations avoisinant 200 mm par mois sur tout le territoire.

Les principales isohyètes sont tracées sur la figure 1. Dans la moitié nord-est du pays, ainsi que le long de la majeure partie des côtes du sud-est, les précipitations sont inférieures à 2 000 mm par an. L'isohyète 2 200 mm met en relief les zones de précipitations plus importantes : le massif du Chaillu au centre, et le bord nord-ouest du territoire entre les monts de Cristal (Médouneu) et le sud de Libreville.

3. LE BASSIN-VERSANT DE L'OGOOUÉ

3.1. LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

L'Ogooué est le plus grand fleuve gabonais (fig. 1). Son bassin draine 215 000 km² dont 22 000 hors du territoire national. Il est limité à l'est par le bassin du Congo, au sud par les bassins du Niari et de la Nyanga, à l'est

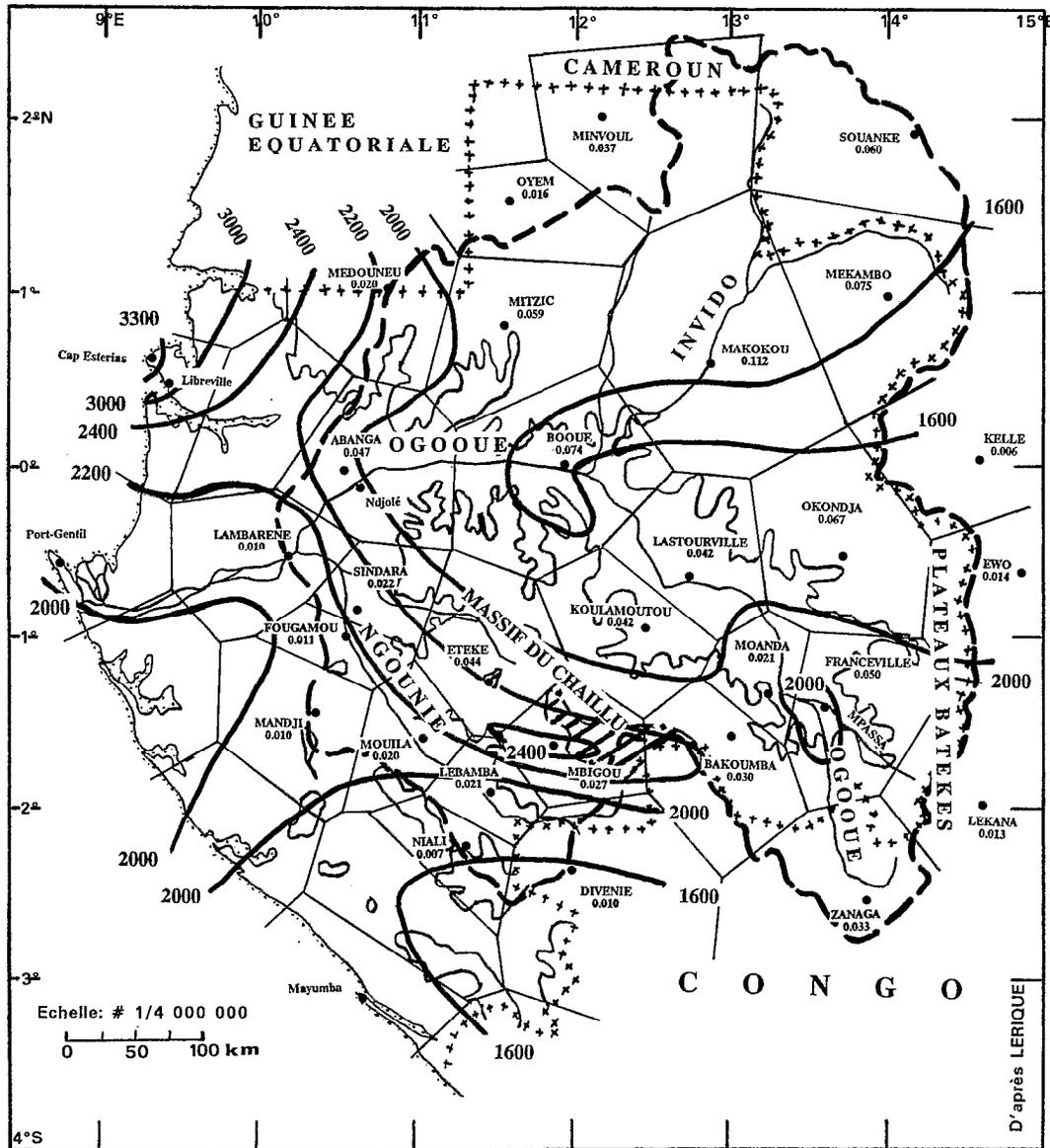


FIG. 1. — Carte morpho-climatique du Gabon et du bassin-versant de l'Ogooué. Les croix marquent les frontières du Gabon, le tiret gras les limites du bassin versant, les isohyètes moyennes interannuelles sont en trait gras plein. Les polygones de Thiessen sont en trait fin, les noms des postes pluviométriques correspondants ainsi que les coefficients de pondération associés, en petites capitales. L'altitude 400 m est matérialisée par un trait moyen continu, la courbe des 800 m par un trait tiret-pointillé délimitant une zone hachurée. Seuls les Monts du Chaillu présentent un massif d'altitude supérieure à 800 m, mais ailleurs dans le pays des reliefs isolés se dégagent d'un relief plus plat et culminent à plus de 800 m : dans la pénélaine du nord-est ou dans le massif de la Nyanga au sud-ouest.

et au nord-est par les bassins de rivières côtières. Il est en majorité recouvert de forêts ombrophiles et de savanes boisées. Parcourant environ 1 000 km, l'Ogooué prend sa source au Congo dans les monts Ntalé, à une altitude voisine de 840 m. Son cours peut être présenté en quatre biefs de pentes très différentes.

Jusqu'à la confluence avec la Mpassa (15 300 km²), la pente est forte (1,8 m.km⁻¹). Elle diminue à 0,3 m.km⁻¹ jusqu'à la confluence Ogooué-Invido où le fleuve double la surface de son bassin-versant à travers des apports respectifs

de 66 100 et 62 700 km². L'Invido est le plus important affluent de l'Ogooué. Il draine le quart nord-est du pays, pénéplaine développée sur les formations anciennes du socle cristallin.

Entre la confluence avec l'Invido et Ndjolé, la pente est de 0,8 m.km⁻¹. A Ndjolé l'Ogooué quitte son lit rocheux pour des alluvions sableuses et rejoint son embouchure avec une pente de 0,1 m.km⁻¹. En rive gauche, à 5 km en amont de Lambaréné, la Ngounié joint ses eaux à celles de l'Ogooué. Cette rivière draine 33 100 km². C'est le second affluent du fleuve.

Le bassin-versant de l'Ogooué est principalement développé sur les roches cristallines du socle. Mais on peut séparer trois régions hydrogéologiquement contrastées. Dans le nord-est à Makokou, le coefficient de ruissellement de l'Invido est faible : 31,8 %, alors que les formations drainées appartiennent au socle. Mais un modelé très plat, un sol très profond et de larges vallées alluviales ralentissent les écoulements. Les sols sont par contre très peu développés sur les granito-gneiss du massif du Chaillu, entraînant des écoulements importants dans le bassin de la Ngounié — coefficients de 47,9 % à Mouila et de 49,3 % à Fougamou —, et dans le haut-bassin de l'Ogooué à Franceville (46,3 %) malgré la régulation du régime par les puissantes formations grés-sableuses des plateaux batékés. Ces grès et sables batékés et dans une moindre mesure les formations schisteuses et calcaires du bassin de la Ngounié, entretiennent un volume écoulé retardé important qui modifie positivement les écoulements durant les périodes d'étiage et atténue l'amplitude des ondes de crue : « Le débit de base émanant des plateaux batékés joue un rôle décisif dans le soutien d'étiages qu'il régularise et alimente pour près de 50 % au mois de septembre. Les débits à Franceville (8 670 km²) sont alors comparables aux minima du bassin quatre fois plus vaste de l'Invido à Makokou » (CARRÉ, 1978, p. 17).

3.2. APERÇU DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DE L'OGOOUÉ À LA STATION DE LAMBARÉNÉ

Le bassin-versant de l'Ogooué à Lambaréné couvre une superficie de 203 500 km². Le module moyen sur 55 ans (1930-1984) est de 4.680 m³.s⁻¹ et le débit spécifique de 23,0 ls⁻¹. km⁻².

La modulation mensuelle des débits (fig. 2) est de type équatorial à deux crues et deux étiages, personnalisée par la contribution de certaines unités régionales. Le plateau de l'Invido exporte les premières ondes de crue dès septembre. La durée du maximum de novembre est étendue sur décembre par la participation plus tardive des fractions australes du bassin, qui assurent ensuite le soutien des basses-eaux de petite saison sèche de janvier à février en général, et du maximum secondaire d'avril-mai. Ce sont encore des bassins à longue saison sèche australe mais disposant de réserves souterraines (les plateaux batékés principalement) qui fournissent la part la plus importante des débits d'étiage début septembre. Le maximum annuel est dans 70 % des cas observé en automne.

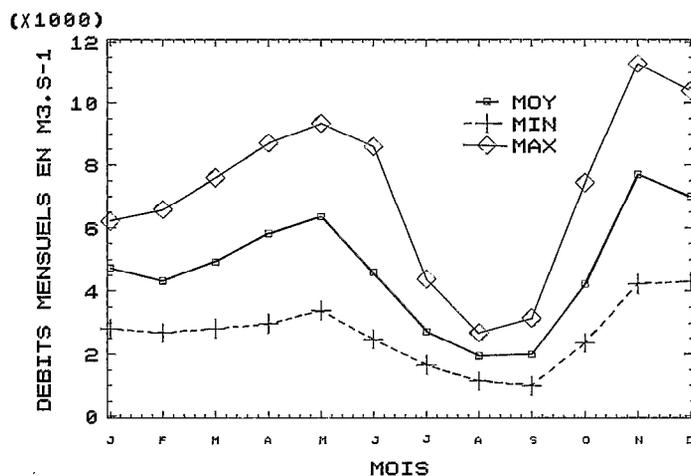


FIG. 2. — Modulation mensuelle des débits moyens (MOY), minimums (MIN) et maximums (MAX) de l'Ogooué à Lambaréné, calculés sur la période 1930-1984.

4. RECONSTITUTION DES DÉBITS MANQUANTS

4.1. OBJECTIFS

Le but est d'établir des relations qui permettent d'estimer les valeurs mensuelles de débit pour une période allant de septembre 1950 à août 1953, et pour les années plus récentes, à partir de septembre 1983. Cette reconstitution répond à trois exigences :

- valoriser une des séries de débits qui s'inscrit parmi les plus longues qui aient été enregistrées sur le continent africain ;
- offrir la possibilité d'établir des calculs sur la période 1951-1980, qui est la période de référence fixée par l'OMM ;
- obtenir des informations sur les débits postérieurement à septembre 1983, et en particulier sur ceux de 1984, année exceptionnellement pluvieuse au Gabon.

4.2. DONNÉES

La reconstitution est basée sur les relations pluies-débits. Mais durant certains mois de la période de débits à reconstituer à Lambaréné, des mesures ont été effectuées sur d'autres stations du réseau. C'est le cas entre janvier et août 1953, où les débits sont connus à Ndjolé (contrôlant un bassin de 158 000 km²), et première grande station en amont de Lambaréné. De même, de septembre à décembre 1983 la reconstitution est possible à partir des débits de la Ngounié à Fougamou (22 000 km²) et de l'Invido à Makokou (35 800 km²), les deux affluents principaux du fleuve.

Les données pluviométriques de 29 stations (dont 6 postes frontaliers congolais) sont nécessaires pour couvrir le bassin-versant de l'Ogooué à Lambaréné. Le contrôle de la qualité des données a été effectué au laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM (LERIQUE, *op. cit.*) par la méthode dite du « vecteur », mise au point par Y. BRUNET-MORET (1979), et qui consiste en une homogénéisation des valeurs par interrelations entre stations proches.

Le réseau pluviométrique du Gabon est assez dense et de nombreux points de mesure sont déjà installés dès le début des années 50. Mais cette densité n'est pas homogène : les stations sont plus nombreuses dans le sud et l'ouest du bassin, où les précipitations sont les plus abondantes, tandis que le grand nord-est, moins arrosé, en est relativement peu pourvu. L'utilisation des polygones de Thiessen (fig. 1) est nécessaire. Après tracé de ceux-ci, il apparaît que 7 stations sur 29 (24 %), totalisant 1 724 mm par an (moyenne 1951-1980) couvrent 50 % du territoire, principalement le nord et l'est, tandis que les postes restants totalisent 1 980 mm par an.

Mais les risques d'anomalies de répartition de pluie sont plus faibles dans le nord-est, dont le relief de pénéplaine est très peu accidenté : « au nord-est le « marais pluviométrique » de l'Invido semble s'établir aux alentours de 1 650-1 700 mm par an » (CARRÉ, 1978, p. 3). Ainsi la faible densité du réseau dans cette partie du territoire n'a qu'un effet réduit sur la qualité de l'information pluviométrique.

Seul le poste de Makokou présente une série ininterrompue de 1950 à 1980. Tous les autres ont connu des périodes sans observations plus ou moins longues et répétées. Pour les calculs des pluies mensuelles moyennes sur le bassin, nous n'avons donc retenu que les années pour lesquelles la somme des coefficients de pondération de Thiessen atteint 66 %, en ne considérant pour ce calcul que les stations à relevé complet de janvier à décembre. D'autre part nous nous sommes assurés que pas plus de 2 des 7 stations les plus importantes en valeur de coefficient de Thiessen (50 % de surface totale) ne manquent chaque année (fig. 3).

Le tracé des diagrammes pluie-débit est effectué à partir des valeurs de 19 années : 1954 à 1965, 1967 à 1970, 1972, 1973 et 1975. Cet échantillonnage est représentatif des différentes périodes de variation de débit de l'Ogooué après 1950 : décennie 1950 déficitaire, décennie 1960 excédentaire et 1970 moyenne (fig. 4) (MAHÉ, 1987). Parmi les 19 années de l'échantillon se trouvent le module maximum de la série 1930-1984 (5 990 m³.s⁻¹ en 1961), le minimum sur la même période (3 090 m³.s⁻¹ en 1958) et le module médian (4 420 m³.s⁻¹ en 1968). Les autres modules sont équitablement répartis en 8 valeurs au-dessus de la médiane et 8 au-dessous.

L'ensemble des années contenues dans cet échantillon est donc susceptible de décrire la majorité des types de répartition mensuelle de pluies.

4.3. REMARQUES SUR L'UTILISATION DE LA MÉTHODE DES DÉVIATIONS RÉSIDUELLES

Nous avons utilisé une technique graphique manuelle inspirée de la méthode des déviations résiduelles. Cette méthode est décrite pour la première fois par BEAN en 1929. Ses travaux sont repris par EZEKIEL et FOX en 1959, et des exemples d'applications à des problèmes hydrologiques sont fournis par des études de BRUNET-MORET (1965), ROCHE et OLIVRY (1966) et DUBREUIL (1974).

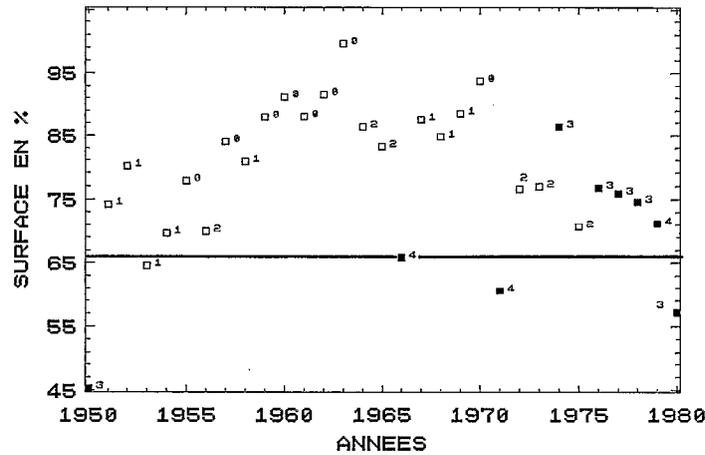


FIG. 3. — Qualité de l'information pluviométrique dans le bassin-versant de l'Ogooué à la station de Lambaréné. En ordonnée figure le pourcentage de surface de bassin couvert par les stations opérationnelles, calculé à partir des coefficients de pondération de Thiessen. La droite marque la valeur 66 %, en-deçà de laquelle les années ne sont pas retenues pour les corrélations pluies-débits. Ne sont pas retenues également les années représentées par un carré noir, durant lesquelles le nombre de stations principales (7 stations totalisant 50 % de la surface du bassin-versant) manquantes est supérieur à deux.

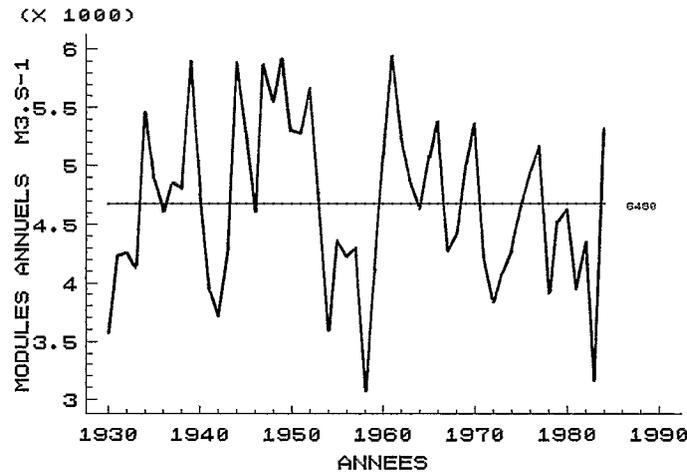


FIG. 4. — Modules annuels de l'Ogooué à Lambaréné de 1930 à 1984. Les modules des années 1951, 1952 et 1984 ont été entièrement reconstitués, ceux de 1950, 1953 et 1983 partiellement. La droite figure le module moyen interannuel : $6\,480\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Nous renvoyons à la lecture des références ci-dessus pour les détails de la technique. Pour la plupart des mois nous combinons les indices de précipitations en un seul de manière à réduire le temps de détermination du débit. La prise en compte systématique de plusieurs indices secondaires aurait nécessité entre autre la subdivision en trois secteurs, nord, sud-est et sud-ouest, correspondants schématiquement à trois grandes unités morpho-climatiques. Mais en 1950 et 1951 les données pluviométriques ne sont pas d'assez bonne qualité pour permettre une régionalisation.

La validation est effectuée mois par mois sur 3 années hydrologiquement contrastées. Ce sont 1966 (hydraulicité de 1,15 sur la période 1930-1983), 1953 (1,02) et 1971 (0,90), années pour lesquelles l'information pluie est bonne : respectivement 65,8, 64,5 et 60,5 % de superficie du bassin-versant couverte (somme des coefficients de pondération de Thiessen).

4.4. CALCUL DES DÉBITS MANQUANTS DE L'OGOOUÉ A LAMBARÉNÉ

4.4.1. Corrélations entre débits

Entre janvier et août 1953, les débits de Lambaréné sont reconstitués à partir de ceux de Ndjolé en amont. Sur un échantillon de 11 années communes, de 1954 à 1964, les coefficients de corrélations mensuelles établis de janvier à août sont tous supérieurs à 0,93. Le tableau I résume les régressions. Bien que l'échantillon soit de taille réduite (11 événements), il contient les années de module annuel maximum (1961) et minimum (1958) de la série 1930-1983 de l'Ogooué à Lambaréné, gage de la représentativité des débits calculés. Les débits de Ndjolé soulignés dans le tableau I ont été eux-mêmes obtenus par corrélation. S'agissant des mois d'étiage les plus importants, les régressions sont très bonnes : R (juin-juillet) = 0,938, et R (juillet-août) = 0,971.

De septembre à décembre 1983, les débits sommés de l'Invido à Makokou et de la Ngounié à Fougamou, restituent les débits de la crue d'automne de l'Ogooué à Lambaréné suivant une corrélation de qualité variable décrite dans le tableau II. En septembre la somme des débits des deux affluents est de $208 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui est très faible (somme la moins forte après 1958 pour la période 1954-1984). Bien que les étiages de 1958 et de 1983 soient comparables, les débits moyens enregistrés à la fin de l'année 1983 rehaussent le module annuel et le placent au second rang parmi les plus faibles après 1958.

4.4.2. Corrélations pluies-débits

Le tableau III résume les indices de précipitation utilisés. Les indices des mois de mars, mai, juin, juillet, août, septembre et octobre sont calculés à partir d'une relation de base SP-R, dans laquelle SP représente la somme pondé-

TABLEAU I
Corrélation des débits mensuels de l'Ogooué à Lambaréné et à Ndjolé, de janvier à août, pour l'année 1953.

		JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU
Echantillons	N	11	11	11	11	11	11	11	11
Pente	A	1.321	1.365	1.333	1.128	1.522	1.414	1.264	1.181
Ordonnée origine	B	576.8	236.5	269.6	1267	-212.0	-289.2	58.92	177.0
Coef. corrélation	R	0.971	0.974	0.981	0.948	0.938	0.976	0.983	0.978
Variance exprimée	R ²	0.943	0.948	0.963	0.900	0.880	0.952	0.966	0.957
Débit Ndjolé en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		3870	3520	4430	4160	4870	4130	<u>2500</u>	<u>1820</u>
Débit Lambaréné en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		5690	5040	6180	5960	7200	5550	3200	2320

TABLEAU II
Corrélation des débits mensuels de l'Ogooué à Lambaréné à ceux de l'Invido à Makokou et de la Ngounié à Fougamou, de septembre à décembre, pour l'année 1983.

		SEP	OCT	NOV	DEC
Nombre d'échantillons	N	12	29	26	29
Pente	A	2.682	0.298	0.275	0.265
Ordonnée à l'origine	B	777.3	40.15	345.7	332.9
Coefficient de corrélation	R	0.747	0.897	0.856	0.723
Variance exprimée en %	R ²	0.558	0.804	0.733	0.523
Invido + Ngounié en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		208	927	2015	2160
Lambaréné en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		1340	2980	6060	7220

TABLEAU III
Indices mensuels de précipitations.

MOIS	INDICES DE PRECIPITATION
JANVIER	$[0,6j + 0,7d + 0,5n + 0,3o + 0,1s] - [0,2(j-xj) + 0,4(d-xd) + 0,7(n-xn) + (o-xo)] - [(d-Xd)(si\ j > xj) + (j-Xj)(si\ d > Xd)]$
FEVRIER	F1 : $[f + 0,3j + 0,1d + (j-xj)(si\ d > Xd)] - [0,5(j-xj) + (f-Xf) + 0,3(d-xd)]$ F2 : f
MARS	$[0,8m + 0,6f - 0,5(m-Xm)]$
AVRIL	$[0,9a + m + 0,4f + 0,2j + [0,1(j-xj) + 0,2(f-xf)]] - [0,5(a-xa) + 0,5(m-Xm)]$
MAI	$[0,6mai + 0,9a + 0,7m + 0,4f + 0,1j] - [0,3(mai - xmai) + 0,6(a-xa) + 0,4(m-xm)]$
JUIN	$[0,6ju + mai + 0,5a + 0,4m] - [0,95(mai - xmai) + 0,5(a-xa) + 0,2(m-xm)]$
JUILLET	$[0,5jl + 0,5ju + 0,65mai + 0,5a + 0,4m] - [0,5(jl-xjl) + 0,5(ju-xju) + 0,65(mai-xmai) + 0,5(a-xa) + 0,4(m-xm)]$
AOÛT	$[0,3ao + 0,7jl + 0,7ju + 0,6mai + 0,4a + 0,3m] - [0,3(ao-xao) + 0,5(jl-xjl) + 0,6(ju-xju) + 0,6(mai-xmai) + 0,4(a-xa) + 0,2(m-xm)]$
SEPT.	$[0,3s + ao + jl + jn + 0,9mai + 0,8a + 0,7m + 0,6f + 0,4j] - [0,15(s-xs)] - 0,75[(ao-xao) + (jl-xjl) + (ju-xju) + (mai-xmai) + (a-xa) + (m-xm) + (f-xf) + (j-xj)]$
OCTOBRE	$[0,9o + 1,2s] - [(s-xs) + 0,3(o-xo)]$
NOVEM.	$[n + o + s] - 0,5[0,3(n-xn) + 0,5(o-xo) + 0,75(s-xs)] - [A - B]$ A - B n'est calculée que si au moins 2 mois parmi s, o et n réalisent P > xP. A la somme pondérée des excédents des 2 mois les plus excédentaires (n-xn, o-xo, s-xs, affectés respectivement des coefficients 1, 0,6 et 0,3) (A), on ôte la valeur $\sum P_j^{ju} - x \sum P_j^{ju}$, somme des précipitations de janvier à juin (pondérées respectivement à 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 et 0,7) moins la moyenne respective sur 19 ans (409mm) (B).
DECEN.	F1 : $[1,2d + 0,8n + 0,3o + 0,1s]$ F2 : $[s + 3ao + 3jl + 4ju + mai + a + m]$ F3 : $[n + o + s + ju + mai] - [(o - n) + 4(jl + ao)]$

P : Précipitations mensuelles

ju : juin
j : janvier jl : juillet
f : février ao : août
m : mars s : septembre
a : avril o : octobre
mai : mai n : novembre
d : décembre

XP : Précipitations très supérieures à la moyenne des 19 ans : (mm)

X est égal à $\frac{x + \text{maximum}}{2}$
Xf : février 176,8
Xm : mars 250,0
Xd : décembre 181,3

xP : Pluies moyennes mensuelles sur 19 ans :
54 à 65, 67 à 70, 72, 73 et 75 (mm)

xj : janvier	126.7 mm	xjl : juillet	14.8
xf : février	146.1	xao : août	23.8
xm : mars	219.9	xs : septembre	124.9
xa : avril	214.1	xo : octobre	295.8
xmai : mai	190.8	xn : novembre	262.3
xju : juin	42.9	xd : décembre	154.3

Dans le calcul des indices de précipitation, les opérations P-xP et P-XP ne sont effectuées que si respectivement xP et XP sont inférieurs à P.

rée des précipitations du mois considéré et des mois précédents et R une fraction ruisselée ne participant pas sur la même période à l'élaboration des débits du mois à reconstituer.

En janvier et février, à cette relation de base on retranche une fraction des précipitations de décembre et janvier (cf. tabl. III). Ceci est nécessaire pour décrire le stockage dans les réservoirs de la partie australe du bassin-versant, lieu principal de précipitations durant la petite saison sèche. Ce stockage ne semble influencer sensiblement sur les débits des mois suivant que lorsque les précipitations sont supérieures à la moyenne en décembre et janvier.

En avril, la restitution lente des eaux stockées dans les réservoirs méridionaux, se traduit par l'ajout à la relation SP - R d'une fraction des précipitations de janvier et février.

En novembre, la relation SP - R est insuffisante à traduire la répartition spatio-temporelle des pluies si les précipitations sont supérieures à la moyenne durant deux mois parmi septembre, octobre et novembre. Il est nécessaire dans ce cas d'appliquer un coefficient modérateur mettant en relation l'intensité des pluies de septembre à novembre et l'état de saturation des sols fin juin.

En décembre la relation SP - R offre de moins bons résultats que la prise en compte de trois facteurs. F1 est la somme pluies d'automne, F2 est lié à l'état de saturation des sols avant l'arrivée des pluies. L'utilisation du facteur F3 est nécessaire pour recalculer certains points encore trop écartés de F2. La diminution de la somme des écarts à F2 après le report des écarts à F3 indique que ce dernier facteur améliore la restitution du débit, mais on ne peut lui trouver d'explication hydrologique simple. DUBREUIL signale qu'avec la méthode des résidus il est possible d'obtenir de tels facteurs, et que dans la mesure où l'information restituée est améliorée il n'est pas déconseillé de les utiliser. Enfin si le coefficient de corrélation pluie-débit de décembre atteint 0,85, les points sont assez dispersés pour les débits élevés, limitant pour ces valeurs la représentativité des débits calculés.

Les valeurs de débits calculés et observés pour les trois années à reconstituer et les trois années test sont reportées sur le tableau IV. Au cours des corrélations pluies-débits nous avons toujours cherché à obtenir une variance exprimée (carré du coefficient de corrélation) supérieure à 50 %, — minimum de 55,2 % pour la corrélation d'octobre, maximum de 83,4 % en août —, soit un coefficient de corrélation supérieur à $1/\sqrt{2}$. Le coefficient de corrélation mensuel moyen est pour les 12 mois de 0,838, d'où une variance exprimée moyenne de 70,4 %. Seuls trois coefficients ont des valeurs inférieures à 0,8. L'écart-type autour du coefficient moyen est très faible : 5,8 %.

TABLEAU IV

Tableau comparatif des débits calculés et mesurés pour les années à reconstituer et les années de validation. Les chiffres entre parenthèses sont obtenus par corrélation avec les précipitations, les débits soulignés sont calculés par corrélation avec ceux de l'Ogooué à Ndjolé, et les chiffres droits sont les débits mesurés à Lambaréné. r est le coefficient de corrélation entre débits calculés et débits mesures, r² est la variance exprimée.

MOIS ANNEES	JA	FE	MA	AV	MA	JU	JL	AO	SE	OC	NO	DE	MODULES m ³ .s ⁻¹	REMARQUES
1950	5350	4970	6090	6160	7980	5460	2990	2090	(1950)	(5100)	(9600)	(6680)	(5300)	septembre estimé par corrélation avec août
1951	(4200)	(4280)	(7230)	(7300)	(7460)	(4280)	(2160)	(2010)	(1640)	(5470)	(9470)	(7820)	(5280)	
1952	(4120)	(4900)	(7190)	(7220)	(8630)	(6250)	(3360)	(2350)	(2490)	(4370)	(9080)	(7940)	(5660)	
1953	<u>5690</u> (5610)	<u>5040</u> (4480)	<u>6180</u> (4040)	<u>5960</u> (4560)	<u>7200</u> (4930)	<u>5550</u> (3640)	<u>3200</u> (2110)	<u>2320</u> (1920)	2050 (2030)	3450 (3610)	6320 (6510)	4300 (4300)	4770 (3980)	Janvier à août sous-estimés car anomalie dans la répartition des pluies
1966	4310 (5140)	4990 (4690)	4890 (4270)	7560 (7350)	9070 (8580)	5550 (5690)	3740 (2950)	2450 (1760)	2120 (2180)	3790 (3400)	8250 (7950)	7730 (7600)	5380 (5130)	
1971	4880 (4030)	3270 (3720)	3890 (4360)	5840 (5640)	4780 (5480)	3360 (4050)	2160 (2690)	1660 (2010)	1990 (2120)	3510 (3850)	8220 (7560)	7030 (7140)	4210 (4390)	
r	.842	.775	.853	.888	.831	.872	.818	.913	.869	.743	.795	.851	Moy.: 0.838	
r ²	.708	.600	.728	.788	.690	.761	.668	.834	.755	.552	.632	.725	Moy.: 0.704	

4.5. LIMITES DE LA MÉTHODE ET CONCLUSIONS

Le cas du mois de décembre met l'accent sur les limites d'utilisation de la méthode empirique des résidus, dans la recherche des relations pluies-débits pour un bassin-versant riche de très nombreuses unités morpho-climatiques aux comportements hydrologiques parfois très différents. Pour certains mois l'échantillonnage de 19 années est peut-être trop restreint pour représenter significativement toutes les facettes du régime du fleuve.

La suite des régressions établies n'introduit pas d'erreurs systématiques dans l'estimation des débits mensuels de la période d'extension, comme le montre la figure 5. Les débits calculés (y) portés sur un graphique en fonction des débits observés (x) forment un alignement de points qui suit à peu près une droite à 45° , il n'y a donc pas de distorsion significative. La droite de régression de y en x , passant par les 21 points (les 19 années utilisées dans l'étude plus 1966 et 1971) correspond à un coefficient de corrélation de 0,944. La distorsion est faible autour de cette droite : $307 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit 6,6 % du module moyen. La variance exprimée étant proche de 90 % l'erreur théorique de l'estimation de chaque débit annuel reconstitué n'est que de 10 %, soit environ $480 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ si l'on se réfère au module moyen.

L'établissement de relations mensuelles pluies-débits permet l'estimation des débits à Lambaréné de 36 mois manquants entre 1950 et 1953. Ces relations sont utilisées pour le calcul des débits de 1984, qui a été une année très pluvieuse sur les côtes des pays riverains du golfe de Guinée (BUISSON, 1985), et pour laquelle les mesures de débit n'ont pas été validées. Les débits mensuels reconstitués fournissent un module d'environ $5\,320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui n'est pas exceptionnel. Mais l'information pluviométrique ne couvre que 40 % du bassin-versant, et manque particulièrement pour le massif du Chaillu, point le plus arrosé de l'intérieur. On peut penser que les précipitations y ont été très abondantes et que le débit annuel pourrait être plus élevé. Malgré ces incertitudes, un débit de cet ordre n'a pas été enregistré à Lambaréné depuis le milieu de la décennie 1960.

5. ETUDE DES DÉBITS

5.1. VALIDITÉ DES DÉBITS ANNUELS ET BILAN D'APPORTS

Les débits sont calculés sur l'année calendaire, l'année hydrologique se déroule de septembre à août. Les débits annuels (fig. 4) peuvent être séparés en deux groupes, avant et après 1960. Avant 1960, des années très déficitaires (1930, 42, 54, 58) alternent avec des années excédentaires (1939, 44, 47, 49, 52). Le maximum interannuel se situe en 1961 et jusqu'en 1983 la tendance à la baisse est continue et les écarts-types entre débits (tab. V) sont plus faibles au cours de cette période qu'auparavant.

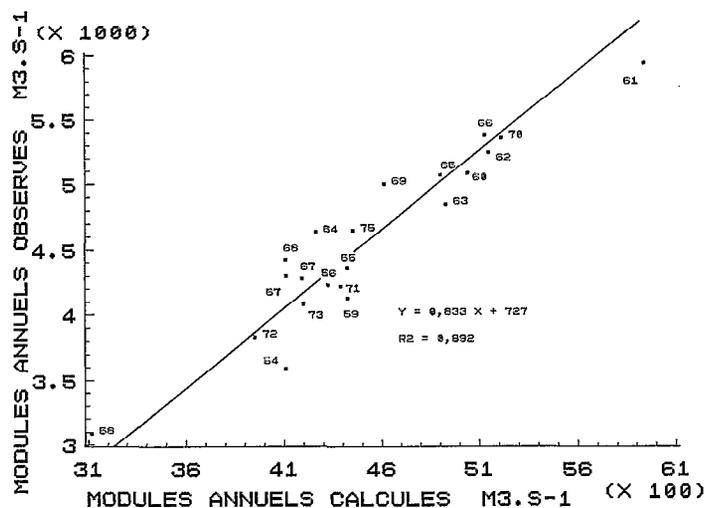


FIG. 5. — Diagramme des débits annuels observés en fonction des débits annuels calculés, de l'Ogooué à Lambaréné. Les deux derniers chiffres des années figurent près de chaque point : la première bissectrice est tracée : r^2 est la variance exprimée.

TABLEAU V
Modules interannuels de l'Ogooué à Lambaréné, et écarts-types, par décennies et autres périodes.

	1930-84	1930-59	1960-84	1930-39	1940-49	1950-59	1960-69	1970-79	1980-84
Années	55	30	25	10	10	10	10	10	5
Q m ³ .s ⁻¹	4.680	4.710	4.650	4.670	4.980	4.470	4.990	4.500	4.280
Ec.-type	703	775	621	675	834	799	484	528	802

Durant la décennie 1950, les débits sont faibles et en 1958 est enregistré le minimum de la série. Durant 6 années consécutives les débits sont inférieurs à la moyenne (1954 à 1959). Cette baisse des débits à l'équateur coïncide avec une période de 10 années de pluies importantes sur le Sahel (1950 à 1959) appelée « petit-pluvial », aux pluviosités annuelles supérieures à la moyenne 1941-1983 d'après l'indice de précipitations sahéniennes de LAMB (1985).

Les débits sont très élevées entre 1960 et 1970 bien qu'une seule valeur dépasse 5 500 m³.s⁻¹, alors qu'entre 1939 et 1952 six valeurs dépassent ce seuil. La diminution des écoulements est effective mais modérée en 1972 et 1973, elle est beaucoup plus forte en 1983.

L'écart-type interannuel n'est que de 15 % (703 m³.s⁻¹), et le rapport entre les modules annuels extrêmes (1961/1958) est de 1,92. Le K3 (module décennal humide/module décennal sec) est de 1,47 (loi de Galton), le coefficient de variation Cv (écart-type des débits annuels/débit interannuel) très faible (0,15) est très proche de celui du fleuve Zaïre à Brazzaville (0,12) alors que les Cv des fleuves subéquatoriaux Nyanga et Kouilou au Gabon et au Congo sont de 0,23 et que ceux des fleuves de la côte nord du golfe de Guinée sont 3 ou 4 fois plus élevés. La similitude de la modulation interannuelle des débits de l'Ogooué et du Zaïre, au bassin 15 fois plus vaste traduit l'influence conjointe du climat équatorial humide et de la régulation annuelle des écoulements, intervenant principalement dans le soutien des étiages et l'étalement des crues.

Les coefficients d'écoulement sont de l'amont à l'aval de 46,3 % à Franceville, de 33,7 % à Booué et de 39,1 % à Lambaréné, traduisant un fort ruissellement sur le haut-bassin (massif du Chaillu en rive gauche), un rendement plus faible des parties nord du bassin (Ogooué à Booué, en aval de la confluence avec l'Invido) et des écoulements importants dans le sud-ouest grâce à la Ngounié qui afflue à l'Ogooué en amont de Lambaréné.

Les variations décennales d'apports figurent dans le tableau VI ainsi que les volumes pour des années exceptionnelles.

TABLEAU VI

Volumes d'apports interannuels, décennaux, et annuels exceptionnels de l'Ogooué à l'Atlantique ; calculés à la station de Lambaréné.

	1930-84	1930-39	1940-49	1950-59	1960-69	1970-79	1980-84	1961	1949	1958	1983
Volume annuel x10 ⁶ .m ³	147.800	147.700	157.200	141.100	157.500	142.000	135.900	187.500	186.800	97.500	99.700
Écart à la moyen. - %	Moyenne	- 0,1	+ 6,4	- 4,5	+ 6,6	- 3,9	- 8,7	+ 26,7	+ 26,4	- 34,0	- 32,5
- volume x10 ⁶ .m ³	10 ans 1 an	- 1.500	+ 94.100	- 66.500	+ 97.500	- 57.600	- 64.300	+39.500	+39.000	-50.300	-48.000

5.2. EVOLUTION DES DÉBITS MENSUELS ET DES MAXIMUMS DE CRUE

5.2.1. L'Ogooué à Lambaréné

Les mois de débits les plus forts dus à la crue principale sont novembre et décembre. La seconde crue est plus étalée et les modules mensuels les plus importants peuvent être en mars, avril ou mai. De même les maximums journaliers s'étalent du 04/11 (1970) ou 28/12 (1937) et du 01/03 (1933) au 18/06 (1934). Jusqu'en 1950 dans 40 % des cas la crue principale se situe au printemps. Ce pourcentage diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche des années récentes et n'est que de 20 % en moyenne après 1950.

Les maximums journaliers annuels (fig. 6) ainsi que les débits mensuels les plus forts n'évoluent pas de manière continue à la hausse ou à la baisse depuis 1930. Par contre, la différence entre les débits journaliers maximums (fig. 6) ou les débits mensuels les plus forts des crues d'automne et de printemps, ne cessent d'augmenter depuis 1930 suivant une tendance presque continue (MAHÉ *et al.*, 1988), jusqu'à une différence entre les deux débits de 1 800 $m^3.s^{-1}$. Ce sont les débits de printemps qui diminuent à partir du milieu de la décennie 1960 (fig. 7), alors que ceux d'automne augmentent légèrement en moyenne jusque vers 1965 puis restent à peu près stables.

Deux faits remarquables se produisent dans l'évolution des débits de mars à mai (fig. 8a). Ils diminuent tous très fortement depuis 1965, et en 1983 ils sont de moitié inférieurs aux maximums enregistrés. D'autre part les débits de mai, qui sont supérieurs de 10 à 20 % (environ 500 à 1 000 $m^3.s^{-1}$) à ceux d'avril jusqu'en 1960, leur deviennent très rapidement comparables après 1965. Les débits de juin diminuent également, ceux de juillet plus modérément et les étiages d'août restent relativement constants depuis 1930, ce qui reflète le poids de la régulation.

En même temps que les débits de printemps diminuent, les crues apparaissent plus tôt. Les maximums journaliers sont observés en mars-avril plutôt qu'en mai — 3,3 à 4,3 événements sur 10 (avant et après 1950), et 6 événements sur 10 depuis 1968 — et sont de moins en moins élevés.

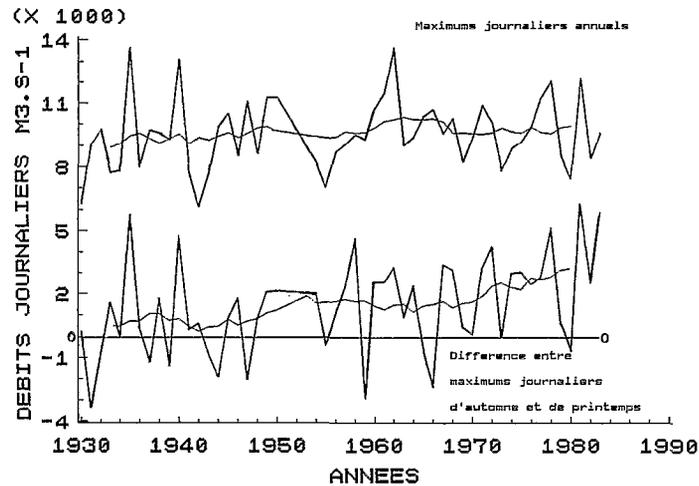


FIG. 6. — Débits journaliers maximums annuels et différence entre débits journaliers maximums d'automne et de printemps de l'Ogooué à Lambaréné de 1930 à 1984. Il n'y a pas de données de 1951 à 1953 inclus. Les courbes en trait plein fin représentent les moyennes mobiles calculées sur 11 termes. Du fait du lissage, les 3 premières et dernières valeurs ont été ôtées.

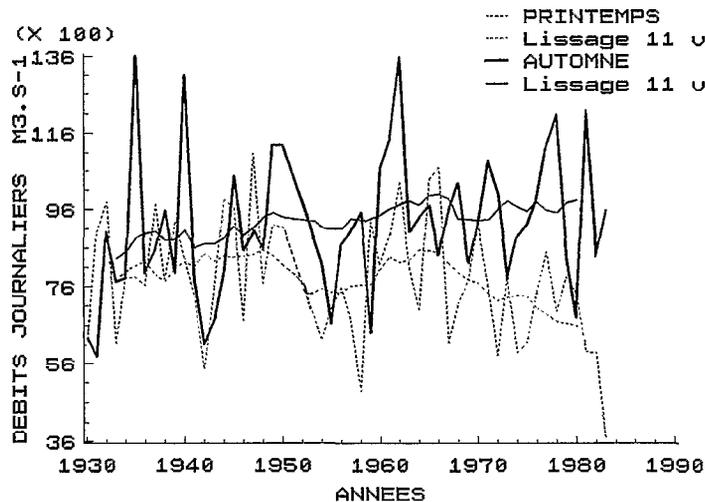


FIG. 7. — Débits journaliers maximums annuels de printemps et d'automne de l'Ogooué à Lambaréné de 1930 à 1984. Il n'y a pas de valeur de 1951 à 1953 inclus. Du fait du lissage, les 3 premières et dernières valeurs ont été ôtées.

Alors que durant la décennie 1930 les débits de novembre et de décembre sont de même ordre, durant la décennie suivante, à l'inverse de ceux de décembre, ceux de novembre continuent d'augmenter. Depuis 1950 les débits d'octobre à décembre suivent une évolution à peu près identique (fig. 8b), accusant des baisses légères durant les décennies 1950 et 1970, puis au début de 1980 sauf ceux de décembre qui ont tendance à augmenter. Les maximums journaliers apparaissent en novembre 3,8 fois sur 10 avant 1949 et 7 fois sur 10 après 1950.

L'analyse de l'évolution des débits mensuels de l'Ogooué à Lambaréné met en évidence une modification du régime de la saison des pluies australes, qui devient moins génératrice de précipitations sur le Gabon. Le régime de l'Ogooué a évolué en trente ans du type équatorial austral (RODIER, 1964) à équatorial boréal depuis la réduction des apports de début d'année.

5.5.2. Les autres parties du bassin

Les débits de l'Invido à Makokou au nord-est (35 800 km²), de la Ngounié à Fougamou (22 000 km²) au sud-ouest, et du haut-Ogooué à Franceville (8 670 km²) dans le sud-est caractérisent les trois grands types de régimes hydrologiques qui existent dans le bassin-versant de l'Ogooué. L'étude des débits mensuels depuis 1953

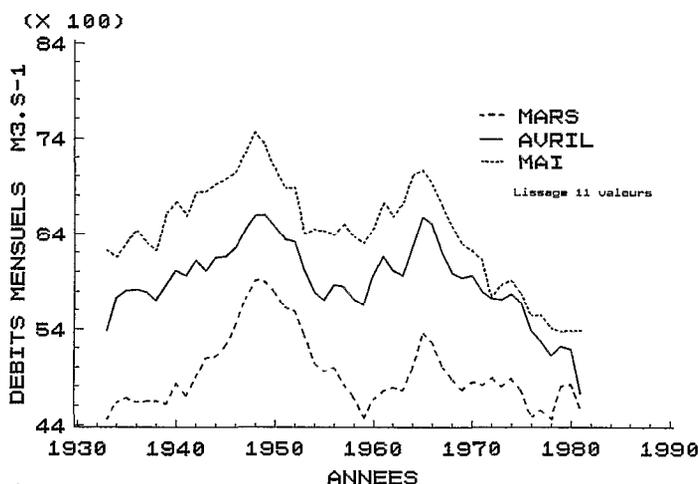


FIG. 8a. — Courbes lissées à 11 termes des débits mensuels de mars à mai de l'Ogooué à Lambaréné de 1930 à 1984. Du fait du lissage, les 3 premières et dernières valeurs ont été ôtées.

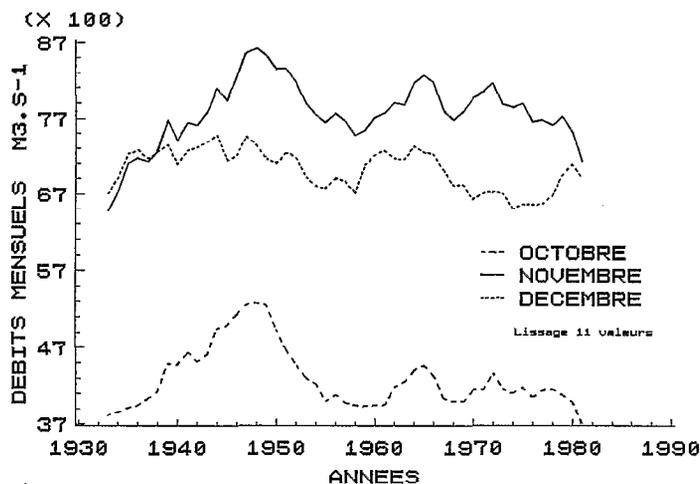


FIG. 8b. — Courbes lissées à 11 termes des débits mensuels d'octobre à décembre de l'Ogooué à Lambaréné de 1930 à 1984. Du fait du lissage, les 3 premières et dernières valeurs ont été ôtées.

à ces trois stations doit permettre de mieux comprendre l'élaboration du régime à Lambaréné, et surtout la différence croissante entre crues d'automne et de printemps.

A Makokou la différence entre maximums journaliers d'automne et de printemps (fig. 9) évolue depuis 1954 de la même manière qu'à Lambaréné. Du début de la série au milieu de la décennie 1960, la différence entre les deux crues passe de 0 à 500-600 m³.s⁻¹ et les débits de printemps ne cessent de diminuer en moyenne (fig. 10).

A Franceville et à Fougamou, les valeurs des maximums journaliers et mensuels de crue d'automne et de printemps évoluent identiquement. Les dates d'apparition des maximums ne varient pas significativement à Franceville ; à Fougamou la crue de printemps se produit plus tôt : d'avril-mai au début de la série, les maximums sont fréquemment observés en février-mars ces dernières années. De même la crue d'automne se produit le plus souvent en novembre depuis le milieu de la décennie 1960. Le maximum est à nouveau observé début décembre depuis 1978, ce qui n'est pas le cas à Makokou. Ce décalage local du maximum en décembre est sans doute à l'origine de la légère remontée des débits de décembre à Lambaréné au début de la décennie 1980.

La nature du sous-sol dans le bassin-versant de la Ngounié est certainement lié à la faible évolution entre les crues d'automne et de printemps, comparée à celles observées à Lambaréné et Makokou. En effet, les précipitations d'automne,

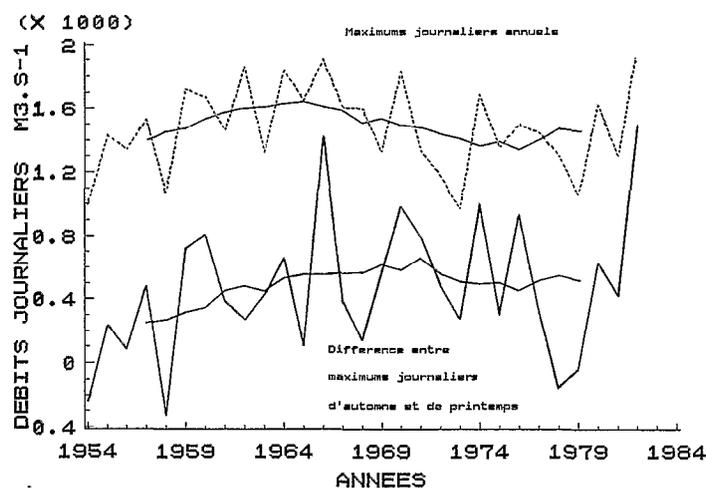


FIG. 9. — Débits journaliers maximums annuels et différence entre débits journaliers maximums d'automne et de printemps de l'Invido à Makokou de 1954 à 1982. Les moyennes mobiles calculées sur 11 termes sont représentées en trait plein. Du fait du lissage, les 3 premières et dernières valeurs ont été ôtées.

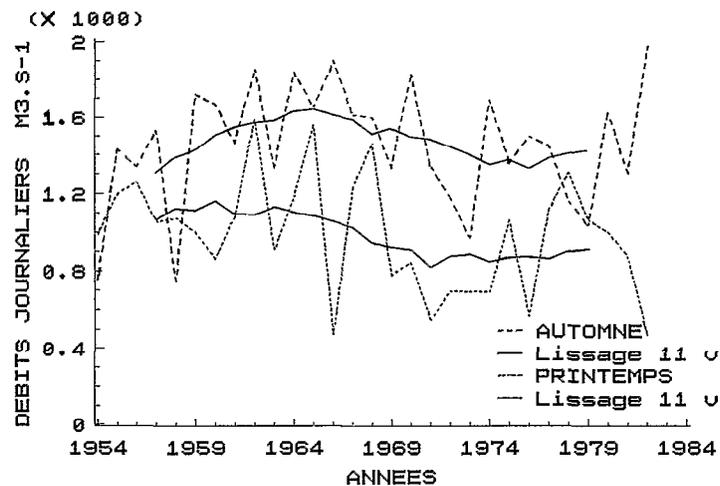


FIG. 10. — Débits journaliers maximums annuels de printemps et d'automne de l'Invido à Makokou de 1954 à 1982. Les moyennes mobiles calculées sur 11 termes sont représentées en trait plein. Du fait du lissage, les 3 premières et dernières valeurs ont été ôtées.

ruisselant sur les sols peu profonds du Chaillu, participent en partie à la recharge des réservoirs calcaires et des karsts de la vallée de la Ngounié. La petite saison sèche étant presque inexistante dans ce secteur, les pluies de printemps ruissellent sur un sol plus ou moins saturé par les pluies précédentes, induisant des rapports écoulements-précipitations plus importants qu'en automne, comme l'indiquent les coefficients d'écoulement du tableau VII. Les coefficients relatifs à la crue d'automne sont à la fois plus faibles et moins dispersés autour de la moyenne que ceux de la crue de printemps.

TABLEAU VII

Coefficients d'écoulement de la Ngounié à Fougamou en automne et au printemps boréal pour quelques années extrêmes.

Année Hydro.	P sep à dec mm	Q oct au 15 jan $m^3.s^{-1}$	Lame Ecoulee mm	Coefficient Ecoulement %	P jan à mai mm	Q 16 jan à mai $m^3.s^{-1}$	Lame Ecoulee mm	Coefficient Ecoulement %
53/54	738	568	239	0,32	994	781	417	0,42
57/58	991	880	370	0,37	629	588	314	0,50
58/59	719	635	267	0,37	1.023	970	518	0,51
59/60	1.190	1.170	493	0,41	1.084	988	528	0,49
60/61	941	1.040	436	0,46	1.254	1.250	668	0,53
61/62	1.350	1.300	546	0,40	988	1.210	647	0,65
62/63	728	706	297	0,41	1.049	944	504	0,40
Moyenne	951	900	378	0,39	1003	962	514	0,50

Les années hydrologiques 1957/1958 et 1961/1962 sont particulièrement démonstratives à cet égard. Les pluies d'automne 1957 sont moyennes ainsi que le coefficient d'écoulement. Au printemps 1958 le déficit pluviométrique est un des plus sévères de la série, le cumul est inférieur d'un tiers à celui d'automne, et pourtant le coefficient d'écoulement est supérieur de 10 % à celui d'automne. Aux très fortes précipitations d'automne 1961 ne correspond qu'un coefficient d'écoulement moyen, par contre les pluies abondantes du printemps 1962 provoquent un écoulement qui est — en pourcentage relatif — plus élevé de 66 %.

A Makokou (tabl. VIII) cette dualité des écoulements ne se retrouve pas. Les totaux de précipitation d'automne et de printemps sont sensiblement identiques mais les pluies de début d'année sont plus étalées dans le temps, les coefficients d'écoulement associés sont plus faibles en général que ceux d'automne. Le sol épais agit comme frein aux écoulements plutôt que comme réservoir (LERIQUE, *op. cit.*). Dans le haut-Ogooué la régulation des écoulements à travers les plateaux Batékés doit expliquer en grande partie l'inertie du régime du fleuve à Franceville vis-à-vis de ces modifications intermensuelles.

TABLEAU VIII

Coefficients d'écoulement de l'Invido à Makokou en automne et au printemps boréal pour quelques années extrêmes.

Année Hydro.	P sep à dec mm	Q oct au 15 jan $m^3.s^{-1}$	Lame Ecoulee mm	Coefficient Ecoulement %	P jan à mai mm	Q 16 jan à mai $m^3.s^{-1}$	Lame Ecoulee mm	Coefficient Ecoulement %
58/59	741	1.160	300	0,40	748	586	192	0,26
60/61	786	1.160	301	0,38	828	547	180	0,22
62/63	714	579	150	0,21	637	447	147	0,24

Il semble donc que l'évolution progressive mise en évidence à Lambaréné de la différence entre les crues d'automne et de printemps soit principalement élaborée à partir des apports du nord du pays — Invido et Abanga, mais les mesu-

res effectuées sur l'Abanga sont malheureusement inutilisables —, et du nord du massif de Chaillu où naissent de nombreuses petites rivières.

5.2.3. Sensibilité des crues aux variations interannuelles des précipitations

Entre 1970 et 1980 les totaux saisonniers de précipitations diminuent autant en automne (septembre à décembre) qu'au printemps (février à mai) (tabl. IX) ; mais les régimes pluviométriques saisonniers sont affectés très différemment, de sorte que seules les crues de printemps s'en trouvent modifiées ; seul le débit maximum journalier se déplace sensiblement vers novembre (cf. 5.5.1.).

En automne, malgré une baisse importante des précipitations en décembre (–15 %), c'est-à-dire en fin de saison des pluies, l'intensité des pluies ne varie pratiquement pas (tabl. Xa) durant les mois de précipitations les plus importants (octobre et novembre) et les caractéristiques des crues (intensité, durée) varient peu par rapport aux décennies précédentes.

Sur la même période les maximums de printemps sont observés en mars plutôt qu'en avril et sont plus faibles qu'au cours des décennies précédentes (tabl. XI). La diminution d'activité de la saison humide australe est surtout effective en avril et en mars, alors que les totaux mensuels de février et mai varient beaucoup moins (tabl. Xb). La durée de la saison pluvieuse ne varie pas ; mais les écarts intermensuels de printemps diminuent ce qui, associé à la diminution des maximums mensuels provoque deux modifications majeures des crues de printemps : la diminution des maximums et la diminution des débits moyens mensuels.

TABLEAU IX

Moyennes décennales des cumuls des précipitations mensuelles de printemps (février à mai) et d'automne (septembre à décembre) sur le bassin de l'Ogooué à Lambaréné, en mm et pourcentages.

ANNEES	Cumul des précipitations mensuelles de printemps (février à mai)		Cumul des précipitations mensuelles d'automne (septembre à décembre)	
	mm	%	mm	%
1950-1959	744	- 2,5	834	+ 1,2
1960-1969	807	+ 5,8	848	+ 2,9
1970-1980	739	- 3,2	794	- 3,6
1950-1980	763		824	

TABLEAU Xa

Moyennes décennales des précipitations mensuelles de septembre à décembre sur le bassin de l'Ogooué à Lambaréné, en mm et pourcentage, et écarts-types entre les 4 mois.

ANNEES	SEPTEMBRE		OCTOBRE		NOVEMBRE		DECEMBRE		Ecart type entre les 4 mois
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	
1950-1959	126	- 0,5	298	+ 2,2	255	- 2,9	155	+ 7,8	81,3
1960-1969	127	+ 0,4	290	- 0,3	273	+ 4,1	157	+ 9,6	81,8
1970-1980	127	+ 0,1	286	- 1,8	259	- 1,1	121	- 15,8	86,5
1950-1980	127		291		262		144		82,6

TABLEAU Xb

Moyennes décennales des précipitations mensuelles de février à mai sur le bassin de l'Ogooué à Lambaréné, en mm et pourcentages, et écarts-types entre les 4 mois.

ANNEES	FEVRIER		MARS		AVRIL		MAI		Ecart type entre les 4 mois
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	
1950-1959	139	- 5,4	223	+ 2,3	195	- 6,7	187	- 0,5	47,1
1960-1969	158	+ 7,5	221	+ 1,4	234	+ 12,0	193	+ 2,7	33,7
1970-1980	146	+ 0,7	210	- 3,7	198	- 5,3	185	- 1,6	27,8
1950-1980	147		218		209		188		31,6

TABLEAU XI

Moyennes décennales des totaux mensuels maximums de printemps (février à mai) et d'automne (septembre à décembre) sur le bassin de l'Ogooué à Lambaréné, en mm et en pourcentages.

ANNEES	Total mensuel maximum de printemps		Total mensuel maximum d'automne	
	mm	%	mm	%
1950-1959	229	-0,9	300	-0,2
1960-1969	246	+6,4	306	+1,8
1970-1980	220	-4,8	297	-1,2
1950-1980	231		301	

6. CONCLUSIONS ET DISCUSSION

Le régime de l'Ogooué est d'une complexité que ne laisse pas apparaître une distribution régulière de pluies abondantes (1 840 mm par an) sur un bassin-versant recouvert de forêts ombrophiles et de savanes boisées.

L'analyse des séries de débits mensuels de l'Ogooué à Lambaréné et de ses principaux affluents met en évidence d'une part les tendances climatiques interannuelles (les périodes de déficit : 1930-33, 41-43, 54-59, 71-74 et 81-83 ; et d'excédents : 1934-40, 44-49, 60-65 et 76-77), et d'autre part témoigne de la modification du régime de la saison des pluies australes donnant naissance à des crues plus faibles qui apparaissent plus tôt en début d'année.

La réduction des apports de printemps ne peut être due à un effet de recharge de la nappe accentué par la persistance de situations déficitaires pour deux raisons. La première est liée au climat. Les précipitations annuelles sont supérieures à la demande évaporatoire, même durant les années de faible pluviosité, et la saison sèche n'excède pas 3 à 4 mois. La seconde est tirée du fait que la plus importante période de déficits continus sur le bassin-versant de l'Ogooué se situe durant la décennie 1950 (-7,4 %), soit avant l'importante baisse des débits de printemps. Les déficits sont modérés durant la décennie 1970 (-3,1 %) et seul le déficit de 1983 est comparable en intensité à celui de 1958. Malgré tout depuis 1961 les modules annuels suivent une tendance continue à la baisse, qui se retrouve peu dans l'évolution des maximums journaliers annuels, puisque l'intensité de la grande saison des pluies d'automne varie faiblement.

Enfin il est difficile d'estimer l'influence des masses d'air australes sur la modification des apports de printemps, car leurs mouvements sont mal connus ainsi que leurs capacités pluvigènes. Ce pourrait constituer un travail complémentaire à cette étude.

6.1. HYPOTHÈSES SUR LES ORIGINES POSSIBLES DES VARIATIONS CLIMATIQUES AU GABON

Les causes de la modification durable du régime des pluies au Gabon et des débits de l'Ogooué ne peuvent être appréhendées sans une approche globale, à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, qu'on peut aborder par une analyse de l'évolution de certains paramètres environnementaux durant les dernières décennies. Il s'agit entre autres, — à part les pluies et les débits —, des températures de surfaces de l'upwelling équatorial atlantique (MAHÉ *et al.*, 1990) et de la vapeur d'eau atmosphérique, paramètres situés en amont des phénomènes pluvigènes et qui sont susceptibles de contenir une information sur la qualité des pluies à venir. Cette analyse comparative doit permettre d'élaborer des schémas relationnels simples entre paramètres, et de définir les principaux types de situations climatiques et leurs tendances évolutives.

6.1.1. Evolution de la vapeur d'eau atmosphérique au Gabon de 1980 à 1987

La figure 11 représente les anomalies de vapeur d'eau intégrée entre 300 et 1 000 Hpa de janvier 1980 à décembre 1987, par quinzaines, dans une zone comprise entre l'équateur et 5° sud, 10° est et 20° est, couvrant aux deux tiers le bassin-versant de l'Ogooué. Les données de base proviennent du Centre Météorologique de Reading à raison d'un point par 2,5 degrés de côté. La vapeur d'eau a été très peu étudiée jusqu'à présent, les données de Reading en permettent une première approche, mais le pas de la grille de points est trop grand pour obtenir des résultats d'une précision comparable à celle que l'on peut avoir avec les données satellitaires de température de surface de la mer (TSM) par exemple.

Les variations interannuelles de vapeur d'eau peuvent dépasser 20 %. L'anomalie négative en 1980 change de signe progressivement et régulièrement durant cinq années et devient très positive en 1984, année de précipitations exception-

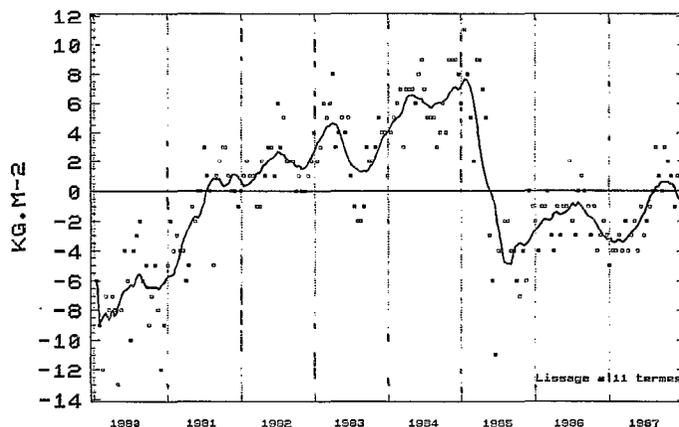


FIG. 11. — Anomalies de vapeur d'eau atmosphérique, intégrée de 1 000 à 300 Hpa, sur la zone 0 à 5 degrés sud, 10 à 20 degrés est, par quinzaines, de janvier 1980 à décembre 1987. La courbe en traits pleins représente la moyenne mobile à 11 termes.

nelles au Gabon et sur le littoral du golfe de Guinée, alors que c'est une année extrêmement sèche au Sahel. Au cours des six premiers mois de 1985, la teneur en vapeur d'eau diminue spectaculairement dans la zone et coïncide avec une reprise des pluies au Sahel, proches de la normale 1951-1980. Parallèlement cette année là le module du Kouilou à la station de Sounda est inférieur à la moyenne. Mais le sens des variations interannuelles des débits des fleuves équatoriaux situés dans la zone (Ogooué, Nyanga, Kouilou) n'est pas toujours identique à celui de la vapeur d'eau. En effet l'abondance des précipitations dépend de l'utilisation de cette vapeur par des phénomènes pluviogènes qui peuvent ne pas suivre les mêmes variations. Par exemple, en 1983 bien que l'anomalie de vapeur d'eau soit positive, les pluies et les débits sont inférieurs de 30 % à la moyenne.

Il n'est pas possible pour l'instant d'établir une relation entre la vapeur d'eau et les précipitations, car la genèse des pluies dépend d'autres facteurs atmosphériques tels le champ de vent en altitude et le champ de pression. Sa présence, même en excès n'est pas suffisante pour assurer une bonne pluviométrie. Mais l'étude de sa répartition en Afrique de l'ouest et centrale constitue un élément supplémentaire pour la compréhension des récentes variations climatiques.

6.1.2. Diminution de l'intensité de l'upwelling équatorial atlantique entre 1964 et 1987

L'influence des océans sur le climat est fondamentale. On sait que la présence en surface d'eaux plus froides que les basses couches de l'atmosphère, a tendance à stabiliser les mouvements atmosphériques et par là à réduire les possibilités de développement de nuages convectifs générateurs de pluies. A l'inverse un océan plus chaud que l'atmosphère va la rendre instable induisant des phénomènes convectifs plus intenses (WAUTHY, 1983). Les remontées d'eaux « froides », près des côtes du Gabon entre autres, ont souvent été rendues responsables des sécheresses côtières, mais l'exemple de Cotonou au Bénin (MAHÉ, 1987 : 88-89) bien que moins représentatif montre la difficulté de relier les deux phénomènes avec certitude. En ce qui concerne le Gabon, l'upwelling côtier ne peut avoir qu'une influence très faible sur le bassin-versant de l'Ogooué, séparé de la côte par plusieurs massifs montagneux. En revanche, il se produit au centre du golfe de Guinée le long de l'équateur un upwelling de très grande ampleur en grande partie induit par les alizés du sud-est. Son influence sur la qualité de la mousson pourrait être importante puisqu'il est situé sur sa trajectoire vers l'Afrique.

Entre 1964 et 1987 les températures de l'upwelling augmentent de 0,8 °C en moyenne (MAHÉ, *et al.*, 1990) suivant une tendance assez régulière (fig. 12). Les années d'anomalies très positives — 1968, 1984, 1987 — voient des précipitations anormalement abondantes le long des côtes du golfe de Guinée, pouvant même occulter la grande saison sèche, comme au Gabon en 1984 (BUISSON, 1985). Ces mêmes années, les régions situées au nord du 10° parallèle subissent des sécheresses intenses. C'est également dans ces régions que la diminution des débits est la plus forte depuis 1970 comme l'on montré plusieurs études de l'ORSTOM en particulier. D'après MAHÉ et OLIVRY (*à paraître*), pour la période de 1971 à 1989 le déficit est de 42,5 % en moyenne dans les bassins versants du Sénégal, de la Gambie et du Nord de la Guinée. La diminution des débits est plus faible dans les régions habituellement plus arrosées : monts de Guinée (-17 %) et massifs camerounais (-19 %).

Elle est très faible pour le Congo (-6,3 %) et pour les fleuves équatoriaux (-7,6 %). Elle est inexistante pour certains fleuves et rivières très proches de l'équateur : pour la Nyanga (-1,7 %) et la Ngounié — affluent de l'Ogooué

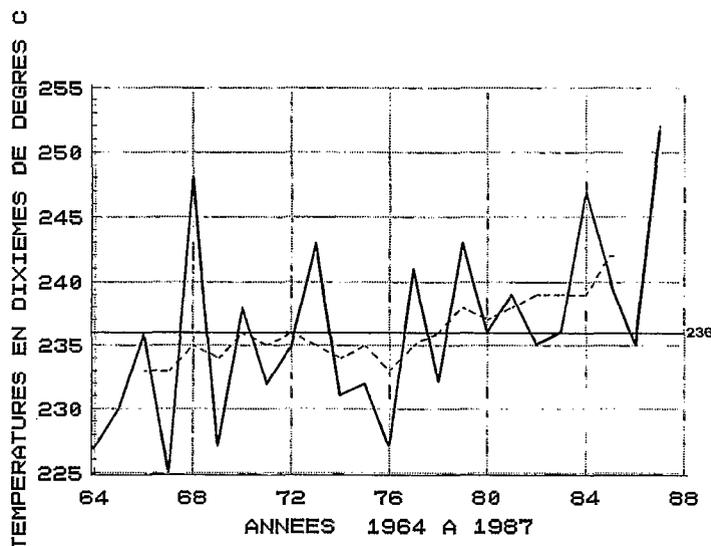


FIG. 12. — Moyennes des températures de surface de l'upwelling équatorial atlantique pour les mois de juillet à septembre, mesurées dans la zone 2 degrés nord, 2 degrés sud, 8 degrés ouest, 12 degrés ouest, entre 1964 et 1987 (d'après MAHÉ et al. 1990).

La courbe en trait discontinu représente la moyenne mobile sur 11 termes, le trait horizontal indique la température moyenne sur la série (23,6 °C).

— (-0,6 %). La sécheresse quasi-continue de ces vingt dernières années est d'autant plus marquée dans les précipitations et les débits que l'on s'éloigne de l'équateur, et que le régime des pluies est moins régulier. La baisse continue de l'intensité de l'upwelling équatorial indique que l'océan a également réagi de manière durable aux modifications climatiques récentes.

Les diminutions d'intensité de l'upwelling équatorial atlantique et des débits de tous les fleuves africains — sauf proches équatoriaux — peuvent avoir une cause commune : une modification du régime de l'alizé austral de sud-est, qui provoquerait en moyenne depuis vingt ans, à la fois un upwelling plus faible et une mousson moins pluvieuse vers le tropique nord.

Les régions équatoriales sont moins sensibles à ces modifications et cette observation rejoint les prédictions de SCHLESINGER et MITCHELL (1987), reprises par ROYER (1988) concernant les implications possibles de l'augmentation de l'effet de serre : l'accroissement des précipitations serait concentré autour de l'équateur et au-delà de 50° de latitude, alors que celles-ci diminueraient sous les tropiques, en particulier entre 10° et 30° nord. La réduction des gradients de températures entre l'équateur et les pôles entraînerait une possible diminution des échanges énergétiques méridiens, pouvant conduire à une modification du régime des alizés...

6.1.3. Conclusion

Il n'existe pas de modèle simple permettant d'expliquer les variations climatiques récentes au Gabon. Nous avons connaissance de séries temporelles de nombreux paramètres climatiques : pluies, débits, températures de surface de la mer, vapeur d'eau atmosphérique (les champs de vent et de pression concernant le Gabon pourraient également être étudiés). L'étude comparative de leurs relations apporte des renseignements nouveaux pour la compréhension des mécanismes climatiques, mais crée également de nouvelles interrogations. Il semble nécessaire de considérer la circulation — au moins tropicale — dans son ensemble, pour nous permettre de mieux comprendre, et par là de pouvoir mieux prévoir, les variations climatiques. Une des voies de recherche actuelle concerne les circulations atmosphériques zonales de WALKER, schématisées par des cellules de mouvements aériens, dont une branche est ascendante — au niveau des zones de convections —, et l'autre descendante — créant des zones de subsidences —. Une « information atmosphérique » pourrait transiter par l'intermédiaire des contacts entre ces cellules, et ainsi répercuter des variations hydrométéorologiques d'une zone climatique à une autre.

BIBLIOCRAPHIE

- Anonyme, 1979. — République du Gabon. Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. ORSTOM, CIEH, Ministère de la Coopération. Paris, 403 pp., *multigr.*
- Anonyme, 1988. — Précipitations mensuelles au Gabon de 1966 à 1980. ORSTOM, CIEH, ASECNA Dakar, Ministère de la Coopération. Montpellier, 50 pp., *multigr.*
- BRUNET-MORET (Y.), 1965. — Influence du corps de l'averse sur le ruissellement d'un petit bassin (bassin du petit Boundjouk). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, n° 3 : 3-32.
- BRUNET-MORET (Y.), 1979. — Homogénéisation des précipitations. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, Vol. XVI, n° 3 et 4 : 147-170.
- BUISSON (A.), 1985. — Une anomalie climatique au Gabon en 1984. *La Météorologie*, 7^e série, n° 8 juin : 36-45.
- CARRÉ (P.), 1978. — Fleuves et rivières du Gabon. Diversité des régimes hydrologiques. 24 p., 2 cartes. République gabonaise. Centre national de la recherche scientifique et technologique. Section d'études et recherches en hydrologie.
- DUBREUIL (P.), 1974. — Initiation à l'analyse hydrologique. 233 pp. Masson-ORSTOM Editeurs, Paris.
- EZEKIEL (M.), FOX (K.), 1959. — Methods of correlation and regression analysis. Linear and curvilinear. 547 p., Third edition. John Wiley and Sons Ed. New York.
- LAMB (P.J.), 1985. — Rainfall in subsaharan West Africa during 1941-83. *Zeit. Gletscherk Glazialgeologie*, 21 : 131-139.
- LERIQUE (J.), *A paraître*. Fleuves et rivières du Gabon. Collection *Monographies Hydrologiques* de l'ORSTOM.
- MAHÉ (G.), 1987. — Etude de la variabilité des apports hydriques continentaux dans le golfe de Guinée, en liaison avec son hydrologie océanique de surface. Mémoire de DEA National d'Hydrologie, filière « Ressources en Eau ». Université d'Orsay (Paris XI), centre ORSTOM de Montpellier, 138 pp., *multigr.*
- MAHÉ (G.), OLIVRY (J.C.), LERIQUE (J.), 1988. — La variabilité du régime des tributaires du golfe de Guinée : indice de crises ou de changements climatiques ? in OLIVRY (J.C.) : Géodynamique de l'Hydrosphère Continentale, Rapport Scientifique 1983-1987. ORSTOM : 115-121, *multigr.*
- MAHÉ (G.), DEMARCO (H.), CITEAU (J.), 1990. — Evolution des températures de surface de l'upwelling équatorial Atlantique de 1964 à 1988. *Veille Climatique Satellitaire*, n° 33, juillet : 37-43.
- MAHÉ (G.), *A paraître*. La variabilité des apports fluviaux au golfe de Guinée utilisée comme indice climatique. In : Variabilité, instabilité et changement des pêcheries ouest-africaines. Séminaire, centre de Recherches Océanographiques de Dakar Thiaroye, 12-16 décembre 1988. Ed. Sci. CURY (P) et ROY (C.). ORSTOM, Paris, 13 p. et 11 figures. Hors collection.
- MAHÉ (G.), OLIVRY (J.C.), *A paraître*. Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique Occidentale et Centrale, du mensuel à l'interannuel. Soumis pour le Congrès AISH de Vienne, Autriche, 13 au 15 août 1991.
- ROCHE (M.), OLIVRY (J.C.), 1966. — Données hydrologiques préliminaires pour trois aménagements de Madagascar/Vohitra à Rogez, Ikopa à Ranomafana et Ivondre à Volobe. ORSTOM, Electricité de France. 33 p. + annexes, *multigr.*
- RODIER (J.), 1964. — Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. *Mém. ORSTOM*, n° 6, Paris, 137 pp.
- ROYER (J.F.), 1988. — Le climat du XXI^e siècle. *La Recherche*, supplément au n° 201, juillet-août : 42-50.
- SCHLESINGER (M.E.), MITCHELL (J.F.B.), 1987. — *Reviews of Geophysics*, n° 25, p. 760.
- WAUTHY (B.), 1983. — Introduction à la climatologie du golfe de Guinée. *Océanogr. trop.* ; vol. 18, n° 2, ORSTOM Paris : 103 à 138.