

Aspects scientifiques et techniques de l'hydrologie des zones humides de l'Afrique centrale

J. A. RODIER

39 rue de la Parée, F-85470 Brétignolles sur mer, France

RESUME La région étudiée couvre 5 000 000 km² dont 3 800 000 km² pour le bassin du Zaïre. La variété des régimes est très grande, surtout à l'est. Le relief, des zones sédimentaires ou volcaniques très perméables, des couvertures végétales très différentes, expliquent cette diversité. Les débits spécifiques moyens annuels estimés pour 80 bassins environ présentent des valeurs comprises entre 3 et 55 l s⁻¹km⁻². Avec 43 000 m³s⁻¹ le Zaïre a un débit spécifique de 11.4 l s⁻¹km⁻². La distribution temporelle de ces débits est proche d'une distribution Gaussienne avec des coefficients de variation faible ou très faible. Le déficit d'écoulement, entre 800 et 1300 mm par an est stable. Les débits de crues présentent la même variété et la même régularité temporelle que les moyennes annuelles. L'érosion nulle sous forêt peut être intense en savane et dans les zones à culture mécanique. Des recommandations d'études et de recherches complètent cet exposé.

Scientific and technical aspects of the hydrology of humid zones in central Africa

ABSTRACT The area studied covers 5 000 000 km², including the 3 800 000 km² basin of the River Zaire. The diversity of hydrological regimes is very great, especially in the eastern part. This diversity is explained by differences in slope, degree of permeability of the soils (sedimentary and volcanic zones being highly permeable), and vegetal cover. The specific mean annual discharges have been estimated for about 80 basins: their values vary from 3 to 55 l s⁻¹km⁻². With 43 000 m³s⁻¹, the Zaire River shows a specific discharge of 11.4 l s⁻¹km⁻². The temporal distribution of these discharges is approximately normal with a low or very low coefficient of variation. The runoff deficit of between 800 and 1300 mm year⁻¹ is stable. Flood discharges display variations in magnitude and temporal changes similar to those shown by the annual mean. Erosion is negligible in forest areas but may be high in savanna and in cultivated areas. The paper ends by making recommendations for further studies.

INTRODUCTION

La définition des zones tropicales humides donnée par l'OMM dans son

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

105

81-142/1 13 JUIN 1994 n° : 39655

Cote : B

rapport en préparation sur l'hydrologie opérationnelle dans les régions tropicales humides précise que la latitude doit être inférieure à 40° la hauteur de précipitation annuelle 1000 mm au moins et la température moyenne mensuelle ne doit pas descendre en dessous de 20° . Il est toujours extrêmement difficile de mettre au point une définition acceptable sur le plan mondial. Comme ceci a été proposé au cours de la première réunion des rapporteurs du programme hydrologique international sur l'hydrologie des zones tropicales humides (6-9 juillet 1982) (annexe F), nous pensons qu'il conviendrait d'ajouter, tout au moins pour l'Afrique que dans les zones tropicales on doit trouver au moins six mois par an une hauteur de précipitation dépassant 76 mm. Avec cette condition supplémentaire on élimine ainsi entre les zones tropicales humides et le Sahel au nord, et les régions semi-arides australes au sud, une bande de précipitation moyenne annuelle comprise entre 1000 et 1100 mm qui correspond nettement au point de vue hydrologique à un régime tropical sec, sans éliminer des régions recevant 1000 à 1100 mm par an plus proches de l'équateur où la longueur de la saison des pluies permet de maintenir une couverture végétale correspondant à une zone humide. Il convient également de considérer la limite inférieure de température à 20° valable seulement aux faibles altitudes.

La zone étudiée dans le présent rapport est limitée: à l'ouest par la dorsale séparant le Cameroun du Nigeria et l'Océan Atlantique, au nord par une ligne joignant le rebord sud de la dépression de la Bénoué, la ligne de relief peu élevée qui borde l'Aouk jusqu'à la frontière du Soudan et la bordure méridionale des marais du Sudd, au sud par la limite méridionale du bassin de la Couanza puis la limite sud-ouest du bassin du Zaïre et une ligne joignant Balovale sur le Zambèze à Lusaka. A l'est la limite est très mal définie puisque certaines enclaves en Ethiopie, au Kenya et en Tanzania font partie du régime tropical humide au milieu de zones semi-arides et arides alors qu'à l'intérieur des régions orientales du Zaïre, en Ouganda et en Zambie il existe des enclaves semi-arides et sub-humides au milieu de régions tropicales humides. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

Ces limites correspondent sensiblement aux limites de la zone sub-humide telle qu'elle est définie sur la carte de répartition mondiale des zones arides de l'UNESCO (Note technique no.7 du MAB, Paris 1977). Un certain nombre de zones de faible étendue sont situées à plus de 2000 m et il n'est pas évident que leur climat puisse être classé dans la catégorie tropicale. Cette zone couvre plus de 5 000 000 km² avec pratiquement la totalité du Zaïre, du Gabon, de la Guinée Equatoriale, du Congo, du Rwanda et du Burundi, le Cameroun à l'exception des régions au nord de Adamaoua, l'extrême sud du Tchad, la République Centre Africaine à l'exception du nord, la moitié nord de l'Angola, la plupart des régions septentrionales de la Zambie, une partie du Malawi et de l'Ouganda, l'extrême sud-ouest du Soudan et des enclaves en Ethiopie, au Kenya, en Tanzania et au Mozambique (Fig.1).

Les bassins fluviaux concernés sont:

le Zaïre et ses affluents en totalité à 50 000 km² près. La superficie de ce bassin correspond à plus des trois quarts de la zone étudiée.

La Sanaga, l'Ogooué et le Kouilou respectivement au Cameroun, au

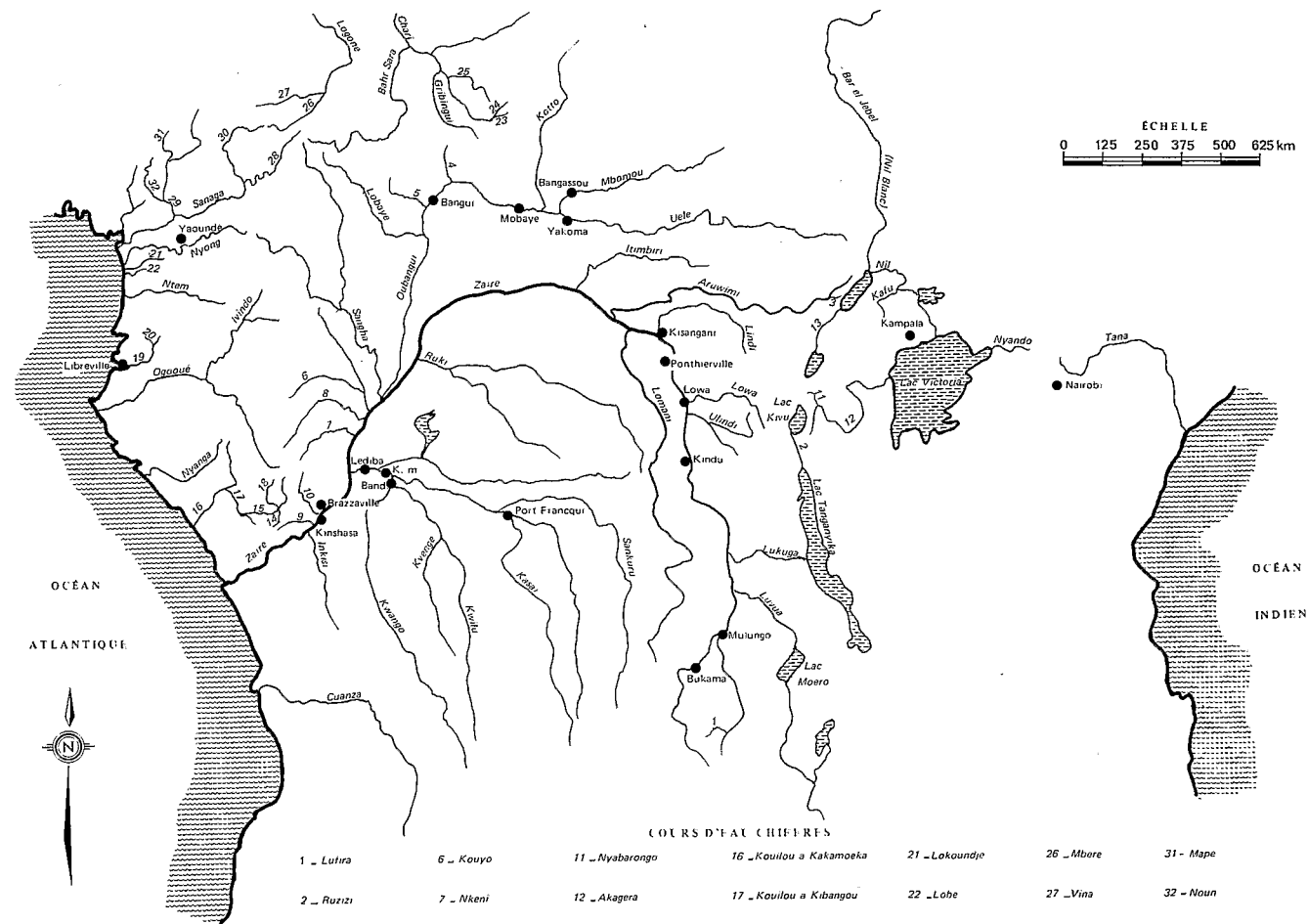


FIG.1 Réseau hydrographique:
Afrique centrale.

Gabon et au Congo, la Couanza en Angola.

Une partie du bassin du Haut Nil y compris le bassin supérieur du Nil Bleu (dont une bonne partie est à haute altitude).

Les bassins supérieurs de la Bénoué (Cameroun) du Chari (Tchad) et du Zambèze (Zambie), une partie du bassin du lac Nyassa.

Un bon nombre de cours d'eau d'importance secondaire.

CARACTERES GENERAUX DE LA REGION ETUDIEE

Cet ensemble massif est très complet puisqu'il couvre tous les régimes tropicaux humides africains, du régime tropical de transition boréal (selon la terminologie des hydrologues français) au régime tropical de transition austral en passant par les régimes équatoriaux. Il présente aussi des caractères marqués de simplicité. D'abord la simplicité relative des mécanismes météorologiques à la base du régime des précipitations que l'on groupe sous le vocable: mousson d'Afrique. Le caractère massif de cette région combiné avec le fait que les très hautes chaînes de montagnes sont situées aux extrémités nord-ouest et est ne peut guère provoquer de perturbations notables des mécanismes météorologiques sur la majeure partie de la région. Enfin l'absence de cyclones tropicaux sur la quasi totalité de cette zone et l'influence négligeable de la neige qui n'affecte que les très hauts reliefs. Il en résulte de notables différences avec un bon nombre de régimes tropicaux d'Asie, d'Amérique ou du Pacifique.

Cette simplicité n'empêche pas une grande diversité due:

à la diversité de constitution des sols qui présentent toute la gamme des perméabilités d'où des régimes très réguliers et relativement irréguliers;

à des hauteurs de précipitations annuelles diverses pour une même latitude;

à l'action des grands massifs montagneux sur le régime des précipitations, ceci est surtout valable pour la région des grands lacs où les précipitations annuelles peuvent passer en 10 ou 20 km de 2000 mm à moins de 1000 mm avec une couverture végétale nettement Sahélienne;

à la présence dans les mêmes régions de types de couvertures végétales très différents forêt dense avec fort amortissement de l'écoulement ou savane protégeant très mal le sol. Le contraste s'aggrave si en plus de l'action des différences de couverture végétale s'ajoutent des perméabilités différentes des sols. On arrive à des résultats analogues avec des cultures extensives sans mesure de conservation de l'eau et des sols.

Tout ceci est développé dans l'analyse des diverses caractéristiques hydrologiques.

VARIATIONS SAISONNIERES DES DEBITS

La classification des hydrologues français comprend cinq régimes types (Fig.2). Si on considère leurs formes les plus simples on peut les décrire comme suit du nord au sud (Rodier, 1964).

Le régime tropical de transition boréal avec une période de hautes de 5 à 6 mois: juin, juillet, août, septembre, octobre, avec un

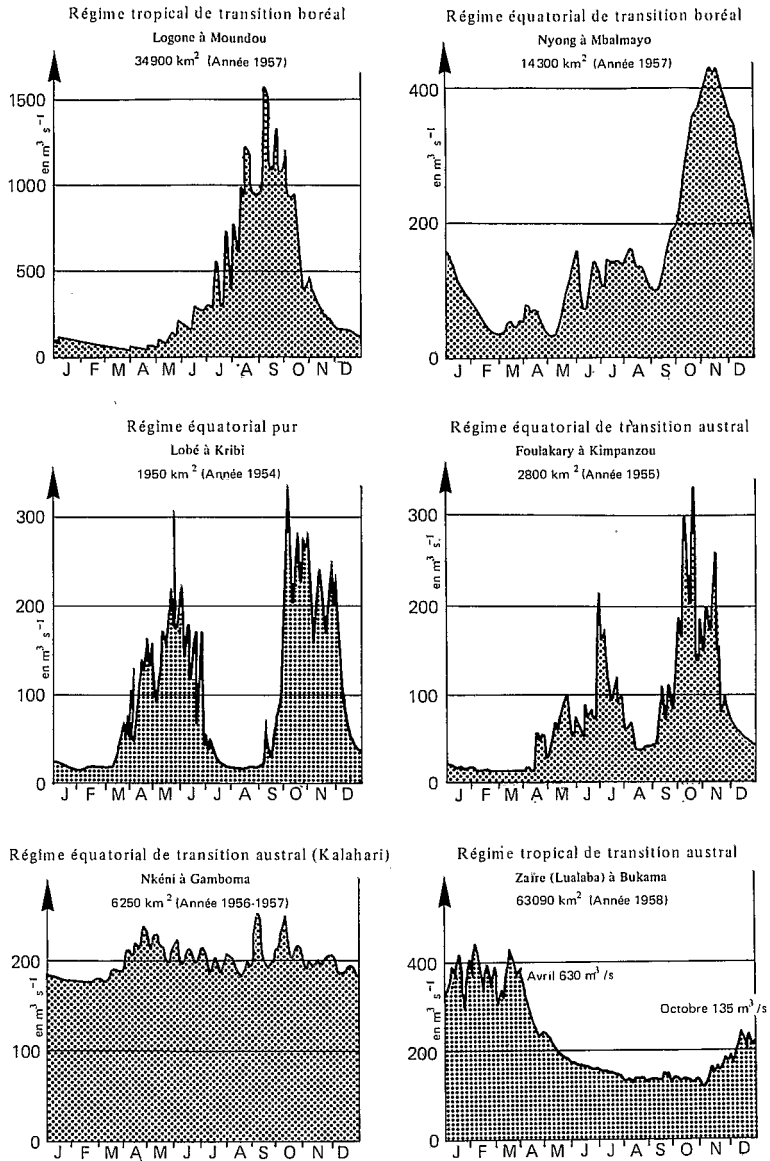


FIG.2 Variations saisonnières des débits.

décalage d'une quinzaine de jours en avant ou en arrière suivant les années, une période de basses eaux de 3 à 4 mois: février, mars, avril; si le sol n'est pas très perméable et la hauteur pluviométrique inférieure à 1500 mm les petits cours d'eau sont à sec pendant deux ou trois mois et enfin deux périodes de transition entre les hautes eaux et les basses eaux.

. Le régime équatorial de transition boréal: la période de hautes eaux se dédouble avec un minimum secondaire en août ou septembre et une assez courte période de basses eaux en février, mars, avril, comportant souvent quelques crues secondaires. Le première période

de hautes eaux est souvent la plus longue mais c'est généralement la seconde en octobre, novembre qui présente les plus fortes crues.

Le régime équatorial pur observé vers les très basses latitudes et sur une bande étroite avec deux périodes de hautes eaux à peu près équivalentes et deux saisons de basses eaux très comparables du 15 janvier au 15 mars et du 15 juillet au 15 septembre.

Le régime équatorial de transition austral avec une assez longue période de basses eaux du 15 juin au 15 octobre, une première période de hautes eaux de novembre à janvier, une courte période de basses eaux en février, mars et une seconde période de hautes eaux en avril ou mai qui présente souvent les débits les plus élevés.

Le régime tropical de transition austral avec une assez longue période de hautes eaux de décembre à avril ou mai, une période de basses eaux de trois mois au moins: août, septembre, octobre, séparées par deux périodes de transition.

Il existe un certain nombre de variantes moins classiques. Par exemple à l'ouest de Bangui et dans beaucoup de régions bien arrosées ou avec un sol perméable le régime tropical de transition présente une période de basses eaux plus courte et une grande régularité interannuelle. Au contraire si la hauteur de précipitation est faible comme sur le haut Loualaba la saison de basses eaux s'allonge et l'irrégularité interannuelle est plus forte.

Pour certaines régions équatoriales en montagne ou en terrain très perméable la plus courte des périodes de basses eaux disparaît pratiquement. D'autres variantes peuvent être observées: si la hauteur de précipitation approche de 1000 mm l'irrégularité interannuelle devient très forte et la saison sèche tend à s'allonger. Au contraire l'action de grands lacs réduit l'amplitude de ces variations. Enfin on doit signaler ici la régularisation extraordinaire des sables du Kalahari qui réduit les variations entre les hautes eaux et les basses eaux équatoriales à de petites ondulations insignifiantes, on reviendra plus loin sur ce point.

Bien entendu les grands cours d'eaux drainant des régions de régimes hydrologiques différents présentent des variations de débits résultants de la combinaison de ces divers régimes: par exemple pour le Zaïre à Kinshasa les variations de débit résultent d'une combinaison complexe de divers régimes où les décalages dus à la durée de l'écoulement sur un bassin de telle dimension jouent un rôle important. Cependant les bassins bien arrosés des affluents les plus abondants du Zaïre confluant pas trop loin de Kinshasa ont une influence beaucoup plus importante sur la forme de l'hydrogramme que l'Uelé, le Mbomou ou les branches supérieures du Zaïre telles que le haut Lualaba ou la Luvua. En définitive les débits du Zaïre à Kinshasa varient comme suit: Le maximum principal $60\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a lieu en décembre, en janvier les débits décroissent jusqu'en mars, c'est la période secondaire de basses eaux avec un minimum de $30\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$; puis vient la seconde période de hautes eaux avec un maximum secondaire dépassant un peu $40\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en mai quelquefois en avril. Cette période est suivie par les basses eaux principales avec minimum principal en août de $25\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ et les débits remontent de septembre à décembre. C'est à peu près le schéma des variations du régime équatorial de transition austral, mais les basses eaux sont beaucoup plus abondantes parce que, comme on le verra par la suite, un bon nombre d'affluents n'ont pas de basses eaux et parce que ces époques

correspondent à l'arrivée vers Kinshasa de hautes eaux provenant des régions les plus éloignées. Il y a aussi l'influence des lacs.

DEBITS MOYENS ANNUELS

Une grande partie des données qui seront présentées ci-après: celles du Zaïre ont été amassées pendant de longues années par le Comité hydrographique du bassin congolais (Devroey, 1951, 1952-1961) une bonne partie d'entre elles ont été revalorisées par Lempicka (1971). Les données de la rive droite du Zaïre et de l'Oubangui proviennent de l'ORSTOM (Rodier, 1964; annuaires ORSTOM 1951-1979; Dubreuil et al., 1975; Billon et al., 1976) ou des Services Hydrologiques Nationaux. Enfin pour l'Afrique de l'Est un bon nombre de données ont été collectées par les Services locaux des Travaux Publics et revues par le projet OMM/PNUD sur le Haut Nil (UNDP-WMO, 1974). D'autres sources ont été utilisées. Elles ont servi à établir le tableau général de données pour 77 stations (Tableau 1).

Lorsque l'on pense aux régimes tropicaux humides d'Afrique on songe souvent à des fleuves de régions forestières avec des débits spécifiques de $15 \text{ à } 20 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$, écoulement $5 \text{ à } 600 \text{ mm}$ par an et c'est vrai pour beaucoup de cours d'eau de la région étudiée mais ce n'est pas le cas général, la répartition spatiale est assez complexe. Il y a d'abord du nord au sud un schéma simple de répartition correspondant à la durée de la, ou des, saisons des pluies en relation avec la latitude; les régions les plus méridionales et les plus septentrionales recevant par an une hauteur totale de précipitations correspondant à la limite de la zone tropicale humide vers 1200 mm , on trouve au nord $4.1 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour le Bangoran sous affluent du Chari, au sud 3.8 pour le Luapula, 2.7 pour la Luvua mais le bassin contient des régions à la limite de la zone tropicale sèche. Au contraire le chiffre du Bangoran est un peu fort, il correspond à une hauteur de précipitation moyenne de 1350 mm , un chiffre de 3.5 serait plus normal (écoulement 110 mm par an). A partir de cette latitude vers le sud les précipitations augmentent progressivement jusqu'à $1800\text{-}2000 \text{ mm}$ vers l'équateur ce qui correspond à $27 \text{ à } 31 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ (écoulement $800 \text{ à } 1000 \text{ mm}$). Puis les débits décroissent progressivement vers la limite sud.

En fait la réalité est beaucoup plus complexe. On retrouve ce schéma mais souvent déformé. Il y a d'abord l'influence de la hauteur de précipitations annuelles telle qu'elle résulte de l'action de l'exposition et du relief. On trouve deux régions à très fortes précipitations: les pentes des Monts Mitumba qui culminent à 3100 m à l'ouest du lac Kivu et qui reçoivent plus de 2200 mm sur une large superficie et la côte du Golfe de Guinée depuis le Nigeria jusqu'à la frontière du Congo qui reçoit jusqu'à $9000\text{-}10\,000 \text{ mm}$ par an sur les pentes du Mont-Cameroun et 6000 mm dans le fond du Golfe mais plus généralement $2200 \text{ à } 3000 \text{ mm}$. Les écoulements correspondants sont probablement de $30 \text{ à } 32 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour la Lova et l'Ulindi qui correspondent à la première région, de $41 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour le petit ruisseau Nzang dans les Monts de Cristal au Gabon, de $55 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour la Lobé au Cameroun, de $38 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour le Wouri au Cameroun.

Mais dans cette région équatoriale il y a aussi des régions

TABLEAU 1 Principales caractéristiques hydrologiques pour 77 stations de la région

Station ou bassin	Surface (km ²)	Précipitation annuelle (mm)	Débit moyen annuel: (m ³ s ⁻¹) (l s ⁻¹ km ⁻²)		Irrég K 3	Crue décennale: (m ³ s ⁻¹) (l s ⁻¹ km ⁻²)		Débit 355 jours (l s ⁻¹ km ⁻²)
BASSIN DU ZAIRE								
Lufira à Kopolowe	8 100	1200	49	6	2.46	175	21	1.74
Luapula à Kasenga	162 210	1000	616	3.8	8.5	3 690	23	0.53
Zaire à Bukama	63 090	1100	322	5.1	2.6	1 250	20	1.85
						1 420*		
à Mulongo	157 660	1000	569	3.6	3	2 130	13.6	1.78
Luvua à Kiambi	245 820	1000	669	2.7	4.36	2 700	11	0.86
Lukaga à Kalemie	244 490	1000?	90	0.37		257	1	0.13
Ruzizu à Bukavu	7 020	1400?	70	10	1.66(lac)			7.55
Zaire à Kindu	810 440	1100?	2 215	2.7	2.6	7 750	9.5	1.0
Elila à Elila	27 380		(380)	14				
Zaire à Elila	838 430		2 590	3.1				
Lowa Ulundi	97 650	2100?	3 140	32?		(6 200)	(63.5)	16.4
Zaire à Lowa	936 000		5 740	6.1	1.65	12 150	13	3.8
à Ponthierville	948 500		6 280	6.6				
à Kisangani	974 300		6 400	6.6	1.4	15 000	15.5	4.5
						20 130*		
Lomani à Opala	89 190	1300	1 214	13	1.35	2 690	30	5.1
Lindi	60 300	1800	(1 200)	20				
Aruwimi à Banalia	220 000	2000	(2 200)	12				
Shari à Budana	4 195		33	8.2	1.77	180	43	3.7
Itimberi à Aketi	31 770	1700	356	11.3	1.91	1 550	49	3
Ruki à Ingende	166 590	2000?	(4 200)	(25)		6 500	39	16.7
Uele à Yakoma	145 000	1700	(1 450)	(10)				2.75
Mbomou à Bangassou	116 000	1500	980	8.4		3 200	13.8	4.3
Oubangui à Mobaye	395 000	1580	3 200	8.1				
Kotto à Kembe	75 000	1360	380	5.1		1 500	20	1.3
Tomi à Sibut	2 500	1490	16.6	6.6	2	155	62	0.6
Oubangui à Bangui	500 000	1560	4 340	8.7	1.4	12 000	24	1.54
						15 800*		
Mbali à Bouali	4 905	1500	59	12	1.5	210	43	4.1
Lobaye	30 000	1480	355	12	1.44	600	20	7.9
Sangha à Ouesso	158 350	1600	1 715	10.8	1.4	4 500	28.4	5.6
						4 730*		
Kouyou à Linnegue	10 750	1620	244	23		650	60	13
Alima à Tchikapika	20 350	1840	575	28		750	37	24.6
Nkeni à Gamboma	6 200	1850	206	33	1.1	290	47	13
						324*		

Kasai à Port Franqui	232 560	1400	2 240	9.7	1.34	5 020	22.3	3.8
à Kutu Moke	737 640	1500	8 790	12	1.2	16 600	22.5	6.3
à Lediba	878 600	1600	11 320	13	1.3			7.5
Kwango à Bandundu	262 900	1600?	3 300	12.5	1.2	6 350	24	9.7
Zaire à Kinshasa	3 747 000		43 000	11.4	1.3	63 000	16.8	6.7
						81 000*		
Foulakari	2 980	1460	54.7	18	2	428	144	4.04
						470*		
Inkisi	13 500	1500?	170	12.5	1.2	550?	41?	4.9
RWANDA								
Nyabarongo	8 900	1400	73	8.2		355	40	4
						400*		
Akagera	30 200	1200	220	7.3		610	20	3
						685*		
UGANDA								
Nil Kioga	350 000	1150	960	2.7	1.65	1 000	2.8	1.28
Semliki	25 000	1200	148	5.9	2.7	250	10	3.7
Kafu	15 490	1200	20	1.65	9.8	100	6.7	0.25
KENYA								
Nyando	2 700	1300	15.2	5.6	5	300	110	0.6
Tana à Garissa	42 200		151	3.6		1 300	31	
SUDAN								
Nil Bleu à Roseires	210 000		1 580	7.5		11 300*		
CONGO								
Comba	90	1470	1.3	14.5		202	2200	
Loudima	3 990							3.25
Niari à Loudima	23 385	1460	380	16.2		1 700	73	
						1 790*		
Kouilou à Kibangou	48 990	1520	855	17.5		3 010	61	
						3 500*		
à Kakamoeka	55 000	1500	935	17	1.6	3 200	59	4.75
						4 090*		
Bouenza	5 800	1720	115	20	1.5	340	58.5	9.5
					1.7			
Nyanga	5 800	1795	217	37.2		800	138	10.3
						893*		
Tchinouka	10.7	1250	0.15	14		7.59	700	
GABON								
Ogooué à Lambaréné	204 000	1850	5 500	27	1.3	12 500	61	8
						13 600		
Ivindo à Makokou	35 800	1700	620	17.3	2	2 000	56	4.45
						2 090		
Nzeme III	3.26	2500	0.14	43				
Nzang	9.2	2500	0.38	41				

TABLEAU 1 continué

Station ou bassin	Surface (km ²)	Précipitation annuelle (mm)	Débit moyen annuel: (m ³ s ⁻¹)	(l s ⁻¹ km ⁻²)	Irrég. K 3	Crue décennale: (m ³ s ⁻¹) (l s ⁻¹ km ⁻²)		Débit 355 jours (l s ⁻¹ km ⁻²)
CAMEROUN								
Ntem	18 060	1770	282	15.7	1.6	1 200	67	4.9
						1 300*		
Nyong	13 750	1550	156	11.3	1.8	482	35	4.8
						575*		
Lokoundje	1 150	1860	31	27	1.6	200	174	3.4
Lobe	1 940	2700	106	55	1.5	504	260	6.6
						540*		
Djerem	20 390	1650	404	19.8		2 000	98	1.26
						2 090*		
Wina du Sud	1 680		39.2	23	1.31	145	86	
Lom	11 100	1480	175	11.8	1.41	675	61	3.2
Mbam	42 300	1780	713	16.8	1.37	3 000	71	1.9
Sanaga à Edea	131 500	1630	2 080	15.8	1.3	7 300	55.5	2.3
						7 700*		
Mape	4 020		102	25.4				
Wouri à Yabassi	8 250	2150	312	38	1.6	1 800	218	7.4
					1.8	1 845*		
Wina Touboro	12 200	1470	144	11.8		1 500	123	0.6
REPUBLIQUE CENTRE AFRICAINE								
Bamingui	4 380	1350	25.3	5.8	2.7	150	35	
Koukourou	5 720	1350	31.4	5.5		170	30	
Bangoran	2 590	1350	10.6	4.1	> 2	57	22	2.15
Gribingui	5 680	1400	29.8	5.25		135	24	
TCHAD								
Mberé	7 430	1470	144	11.8		1 700	230	2.16
						1 930*		
Bahr Sara	67 600	1440	498	7.4	2.5	3 000	44.3	0.17
						3 680*		
Logone à Moundou	33 970	1390	370	10.8	2.05	3 200	94	0.88
						3 640*		

* Crue maximale observée.

défavorisées avec des hauteurs de précipitations variant entre 1400 et 1500 mm au sud-est du Cameroun, région du Nyong; la plaine du Niari abritée par la chaîne du Mayombe reçoit par endroit moins de 1100 mm; enfin à partir du Rift Africain certains fonds de vallée sont semi-arides à commencer par une partie du bassin du lac Tanganyika et plus loin vers l'est en Ouganda et au Kenya les quelques bassins que l'on peut classer dans le régime tropical humide présentent pour des latitudes équatoriales des hauteurs de précipitations annuelles de 1200 à 1300 mm. Souvent ces bassins sont des enclaves humides au milieu de zones semi-arides. On passe d'ailleurs des zones semi-arides aux zones arides en s'approchant de l'Océan Indien. Les écoulements qui en résultent sont les suivants: pour le Nyong (au Cameroun) $11.3 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ les débits sont encore amoindris par des pentes très faibles dans le bief supérieur; dans la plaine du Niari les valeurs minimales du débit spécifique sont peut-être de 1 ou $2 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$; en Ouganda le Kafu $1.65 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ (écoulement 50 mm par an) la très faible pente réduit encore le débit spécifique et au Kenya le Nyando: $5.6 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ (écoulement 175 mm), beaucoup moins dans les zones semi-arides bien entendu.

Mais un autre facteur peut intervenir de façon très importante pour modifier l'abondance des cours d'eau. C'est la perméabilité du sol. Il y a quelques zones karstiques mais leur étendue très limitée ne permet pas de tirer des conséquences quelconques sur les caractéristiques de l'hydrologie de surface qui en résultent. Il y a au voisinage du Rift Africain des formations volcaniques perméables qui jouent un rôle nettement plus important dans une région où déjà la variété des régimes est grande, mais ceci n'intervient que sur de petites surfaces. Par contre certaines formations sableuses et gréseuses du tertiaire par exemple les sables des plateaux batékés (sables du Kalahari) à l'ouest du Congo et au sud de l'équateur jouent un rôle tout à fait remarquable: les précipitations s'infiltrant très rapidement de sorte que pour de petites surfaces le débit spécifique est très faible mais pour des cours d'eau drainant quelques milliers de km^2 les vallées assez profondément incisées récupèrent l'eau des nappes souterraines et en définitive le déficit d'écoulement est plus faible qu'en terrain imperméable, d'autant plus que la couverture végétale, savane presque sans arbre, absorbe peu d'eau. En définitive alors que la hauteur de précipitations annuelle varie entre 1600 et 1850 mm l'écoulement varie entre 725 et 1050 mm correspondant à un déficit d'écoulement de 800 à 850 mm nettement inférieur à ce qu'il est ailleurs. Les débits spécifiques correspondant varient entre 23 et $33 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ correspondant à peu près à ceux des bassins issus des Monts Mitumba beaucoup plus arrosés.

On voit toute la variété des débits spécifiques moyens annuels puisque pour la seule zone équatoriale ils peuvent varier de 1 ou $2 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ à $55 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$.

En région tropicale de transition la variabilité spatiale est moins grande. On trouve entre 2.7 à près de $20 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ au voisinage de la dorsale entre Cameroun et Nigeria où les précipitations sont assez abondantes et le déficit d'écoulement assez faible par suite de l'altitude. Pour préciser on trouve des chiffres compris entre 11 et $17 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ au Cameroun sur le plateau de l'Adamaoua, de 5 à 10 pour le bassin de l'Oubangui, de 10 à 12 pour le bassin supérieur de la Sangha, de 2.7 à 10 pour le sud du bassin

du Zaïre.

On voit que ce grand bassin est assez peu arrosé sur une partie importante de son étendue: la partie nord du bassin de l'Oubangui correspondant à 200 000 km² environ a un débit spécifique inférieur à 5 l s⁻¹km⁻², le Haut Zaïre en amont de Kindu (810 000 km²) a seulement un débit spécifique de 2.7 l s⁻¹km⁻². De la station de Kindu à celle de Ponthierville le débit passe de 2200 à 6280 m³s⁻¹ alors que le bassin est passé de 810 000 à 948 500 km²: cette très grosse différence provient de la partie la plus arrosée des Monts Mitumba.

En définitive le débit moyen annuel à Kinshasa est égal à 43 000 m³s⁻¹ pour 3 747 000 km² correspondant à 11.45 l s⁻¹km⁻². Ce débit moyen annuel classe le Zaïre en seconde position parmi les grands fleuves du monde. La première place est occupée par l'Amazone à Obidos qui pour 4 640 000 km² présente un débit moyen annuel de 160 000 m³s⁻¹ soit 34.5 l s⁻¹km⁻² la majeure partie du bassin recevant plus de 2000 mm par an et il y a moins de zones défavorisées.

A côte du Zaïre les autres fleuves de la région: la Sanaga avec 1630 m³s⁻¹ (15.8 l s⁻¹km⁻²), l'Ogooué avec 5500 m³s⁻¹ (27 l s⁻¹km⁻²), le Kouilou avec 935 m³s⁻¹ (17 l s⁻¹km⁻²), le Nil Bleu avec 1600 m³s⁻¹ (7.5 l s⁻¹km⁻²), le Bahr el Jebel (Nil Blanc) avec 840 m³s⁻¹ (1.9 l s⁻¹km⁻²) sont beaucoup moins importants.

Deficit d'écoulement

Pour les régimes tropicaux humides sans cyclone le déficit d'écoulement: différence entre hauteur annuelle de précipitations et écoulement annuel en mm par an est un paramètre intéressant car il est assez stable: variant assez peu dans le temps on arrive à le déterminer au bout de quelques années, en outre il varie peu d'un régime hydrologique à un autre. Il peut donc rendre de grands services pour le calcul du débit moyen annuel lorsque l'on manque de données hydrométriques.

Par une approche analogue à celle qui a été choisie au début de la section précédente, on arrive à la conclusion que depuis la limite du régime tropical de transition et du régime tropical sec jusqu'au régime équatorial pur avec hauteur de précipitations annuelle dépassant 2000 mm, le déficit d'écoulement passe de 1000 à 1100 mm à un palier de 1150 à 1250 mm pour une hauteur de précipitations annuelle de 1500 à 1600 mm et reste ainsi jusqu'aux régions équatoriales. Notons que dans les régions tropicales humides d'Amérique de Sud, dans les forêts de Guyane Française le déficit d'écoulement est souvent de 1500 mm: les précipitations sont nettement plus fortes: 2400 à 3700 mm et par suite les pertes par interception plus élevées (Roche, 1982).

Tous ces chiffres correspondent à de faibles altitudes. Sur des plateaux dépassant 1000 m le déficit est de 900 à 1000 mm au lieu de 1100 à 1200 mm. Les fortes pentes et un sol peu perméable réduisent le déficit d'écoulement comme sur le Wouri à 950 mm et sur la Comba à 900 mm. Une très forte perméabilité préservant l'eau de l'évaporation diminue également ce déficit pour les rivières drainant les aquifères comme sur les sables du Kalahari où le déficit d'écoulement n'est que de 800 à 850 mm comme on l'a vu plus haut, mais dans le premier cas les débits sont concentrés sur la saison des pluies dans

le second ils sont régularisés. Enfin une pente très faible avec lacs et marécages conduit à un déficit d'écoulement proche du maximum correspondant aux conditions climatiques. Dans la pratique on doit estimer d'abord le déficit d'écoulement tel qu'il résulterait d'un régime hydrologique théorique à faible altitude, avec précipitations modérées et pente modérée puis il faut le moduler si les facteurs de l'écoulement varient largement.

Distribution temporelle de l'écoulement moyen annuel-irrégularité

La distribution statistique des débits moyens annuels est assez souvent une distribution de Gauss ou en est très voisine. Ceci s'explique facilement puisque la hauteur de précipitations annuelle suit également une loi normale et que le déficit d'écoulement varie peu d'une année à l'autre; en plus il n'y a pas de précipitations cycloniques pour perturber cette distribution. Mais pour les régions à faibles précipitations pour lesquelles l'écoulement devient marginal par rapport aux pertes par évaporation le coefficient d'asymétrie devient alors nettement différent de zéro et la distribution s'écarte assez largement de la distribution normale.

Pour mesurer l'irrégularité interannuelle on a utilisé le coefficient K 3: rapport du débit moyen annuel décennal humide au débit moyen annuel décennal sec. Ce coefficient est en rapport étroit avec le coefficient de variation pour une distribution normale ou presque. On trouvera dans le tableau des données 46 valeurs de K, certaines déterminées avec des relevés de 30 à 50 ans, donc précises d'autres simplement évaluées avec une dizaine d'années donc moins sûres. On a éliminé les années 1961 ou 1964 lorsqu'elles figurent dans les relevés car elles correspondent à des périodes de retour nettement supérieur à 10 ans. Malgré le peu de précision qui s'attache à certaines de ces estimations il est frappant de constater que 33 d'entre elles sont comprises entre 1 et 2 ce qui montre une tendance à la régularité pour une bonne partie de la région étudiée. On peut classer les 46 valeurs disponibles en 3 groupes: Le premier qui présente des valeurs de K 3 supérieur à 3 soit un coefficient de variation supérieur à 0.40 correspond à des bassins à la limite du régime tropical sec: deux en Ouganda et au Kenya, les deux derniers concernent la Luvua et la Luapula (le second constituant la partie amont du premier) à l'extrémité sud-est du bassin du Zaïre. Les débits spécifiques sont très faibles ce qui est bien en rapport avec la forte irrégularité interannuelle. On trouverait certainement une valeur de K 3 bien supérieure à 3 pour une bonne partie des tributaires du lac Tanganika. La distribution des débits n'est certainement pas Gaussienne.

Le second groupe présente des valeurs de K 3 comprises entre 2 et 3 soit des coefficients de variation entre 0.26 et 0.40. On y trouve neuf valeurs dont une correspond au Zaïre en aval du confluent de la Luvua donc influencé par cet affluent important. Sur les huit autres sept correspondent à des: rivières tropicales de transition avec des bassins versants médiocrement arrosés comme on en trouve beaucoup en Afrique de l'Ouest avec la même valeur de K 3, le dernier est un bassin en régime équatorial qui ne reçoit pas des précipitations très abondantes. Il faut dire que très souvent, plus le débit spécifique est élevé plus K 3 et le coefficient de variation sont faibles, ceci

est vrai en régions humides comme en régions arides.

Enfin le troisième groupe comprend 33 valeurs de K_3 comprises entre 1, 1 et 2 soit des coefficients de variation compris entre 0.04 et 0.26. Elles correspondent à des bassins tropicaux de transition ou équatoriaux à débit spécifique dépassant $8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ sauf pour le Bahr el Jebel (Nil Blanc) régularisé par le lac Victoria. C'est la très grande majorité des cas et cela justifie la réputation de régularité des cours d'eau de cette région. On peut distinguer trois sous-groupes: un avec coefficient K_3 compris entre 1.5 et 2, un second avec des valeurs comprises entre 1.25 et 1.5 et le troisième réduit ici à trois valeurs, pour K_3 compris entre 1.1 et 1.25.

Il est intéressant de trouver dans le premier sous-groupe le Zaïre à Lova avec $K_3 = 1.6$ à 1.65 alors que 54% du débit provient de l'Ulundi et de la Lova et que le coefficient K_3 à l'amont, à Kindu était égal à 2.6 ce qui tend à prouver que ces deux affluents très abondants ont un coefficient d'irrégularité au plus égal à 1.5 comme les autres bassins arrosés de la région que l'on trouve dans le sous-groupe suivant.

Le second sous-groupe correspond à une grande régularité avec des coefficients de variation compris entre 0.09 et 0.16: c'est le Plateau de l'Adamaoua au centre du Cameroun, une partie du bassin de l'Oubangui, le Kasai et la Lomani. Tous ont des débits spécifiques élevés, supérieurs à $10 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

Enfin le troisième sous-groupe montre une régularité extraordinaire: les plateaux batékés représentés par le bassin du Nkény ont sur toute leur étendue des coefficients K_3 non indiqués dans le tableau et qui sont compris entre 1.1 et 1.25 correspondant à des coefficients de variation inférieurs à 0.09. Ceci est dû à la très grande perméabilité du sol. Le Kwango grossi du Kwilu dont le bassin est bien plus étendu que ces plateaux, avec K_3 égal à 1.2 et des valeurs certainement voisines de 1.1 pour certains affluents du Kwilu tels que la Kwenge, est à classer dans la même catégorie, de même qu'une partie du bassin du Kasai en amont de Kutu Moke. Le Zaïre lui-même à Kinshasa a un coefficient d'irrégularité égal à 1.3 Cette faible valeur est due autant aux phénomènes de régularisation internes propres à certains très grands bassins qu'à la régularité des affluents les plus proches de la station. Notons cependant que sur les $43\,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ du module annuel au moins 10 000 proviennent du troisième sous-groupe.

En ce qui concerne la distribution statistique des débits moyens annuels, le maximum se produisant en décembre, il convient de calculer ces débits sur l'année hydrologique de août à juillet sinon on introduit un sérieux biais pour les valeurs extrêmes: par exemple l'année très sèche 1958 a un débit moyen de $34\,125 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ si on considère l'année calendaire et $32\,460 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ si on considère l'année hydrologique. Pour évaluer un certain nombre de valeurs de K_3 citées plus haut on a donc été obligé de considérer les années hydrologiques qui seules conservent la variance. Cette précaution étant prise, si on étudie les débits moyens annuels du Zaïre avant 1961, on trouve une distribution à peu près Gaussienne avec même un coefficient d'asymétrie légèrement négatif. Mais avec les années exceptionnellement fortes 1961-1962 et 1962-1963 il n'est plus possible de considérer que les choses sont aussi simples. Si on

conservait la même distribution on devrait admettre pour ces deux années des périodes de retour extrêmement élevées, plus de 1000 ans, qui sont peu vraisemblables. En fait la distribution est très complexe. Tout d'abord les débits annuels ne sont pas indépendants, la présence des grands lacs, de nappes souterraines très puissantes s'y oppose, en second lieu les années 1961 à 1964 ont été exceptionnellement fortes sur l'Est Africain donc dans des régions du bassin qui généralement ne jouent qu'un rôle secondaire dans la formation des débits et qui présentent des coefficients de variation beaucoup plus élevés qu'ailleurs; avec ces années 1960, qui ont eu très probablement leurs pareilles dans le passé la série statistique n'est plus homogène et il serait vain de chercher à épiloguer sur la forme de la courbe de distribution d'un aussi vaste bassin.

Heureusement pour les tributaires du Zaïre leurs bassins plus homogènes ne peuvent pas donner lieu à de pareilles difficultés mais on se heurte alors au problème des pseudo-cycles, surtout pour les régimes tropicaux de transition. Les années sèches et humides se succèdent par séries: par exemple la série sèche 1913-1915, la sécheresse récente qui a commencé après 1967, la série humide qui a présenté les années exceptionnelles 1955 et 1961 au nord de l'équateur. Tout se passe un peu comme s'il y avait une série de cycles superposés mais nous nous garderons bien de prendre parti sur ce point qui a donné lieu à bien des controverses. Retenons simplement qu'il y a des pseudo-cycles avec des séries de longueurs inégales. L'intervalle peut être de 20 à 30 ans entre le milieu d'une période sèche et le milieu d'une période humide. Si une analyse statistique sur 20 ans est centrée sur une série humide ou sèche les résultats seront nécessairement faussés. Il est heureux que dans cette zone les corrélations entre rivières voisines soient assez bonnes ce qui permet souvent d'allonger les séries de longueur insuffisantes.

DEBITS MOYENS MENSUELS

Dans la plupart des régions tropicales humides l'ensemble des 12 débits mensuels schématise l'hydrogramme suivant une forme toujours la même chaque année pour un régime hydrologique déterminé. On en a donné une idée dans la section variations saisonnières. Cependant ces variations sont peu visibles dans deux cas: celui correspondant au troisième sous-groupe que l'on vient de considérer pour lesquels les débits mensuels sont à peu près les mêmes toute l'année avec seulement un léger fléchissement en juin, juillet, août, et dans le cas de certains régimes équatoriaux très arrosés pour lesquels seule la grande saison sèche donne lieu à des débits mensuels un peu faibles pendant deux mois avec un décalage possible de un mois, tous les autres mois correspondants à des hautes eaux avec des débits variables assez nettement autour de moyennes assez peu différentes.

Pour les très grands bassins: Zaïre, Oubangui, Sangha, Kassaï, Ogooué, Sanaga, l'hydrogramme annuel est régulier, le découpage en débit mensuel déformant assez peu cet hydrogramme. Pour les petits bassins la montée des débits pour le régime tropical de transition et les périodes de hautes eaux correspondent à une véritable "dentelle" de pointes. Seules les basses eaux, dans ce régime quand les précipitations ne sont pas trop abondantes ou dans le régime

équatorial austral quand il présente une saison sèche bien marquée, correspondent à une récession bien nette et à un palier avec très peu de pointes. Même pour les petits bassins les lacs naturels ou artificiels régularisent la forme du diagramme.

Dans le premier cas cité au début de cette section les débits mensuels restent à peu près constants. Dans le cas général les mois des débits maximaux présentent des débits assez stables dont la distribution est voisine de celle des crues surtout pour les grands bassins. Il en est de même pour les débits des mois de la saison sèche principale quand elle est bien caractérisée, leur distribution est à rapprocher de celles des valeurs minimales annuelles. Mais les mois de transition entre saison sèche et périodes de hautes eaux présentent une irrégularité et donc des coefficients de variation beaucoup plus élevés que pour la distribution des débits annuels, exception faite des rivières à débit à peu près constant. De façon générale cette irrégularité peut être très grande dans le cas des rivières à précipitations déficitaires.

Crues

Il convient d'analyser séparément les crues sur les très petits bassins, moins de 200 km^2 , et les crues sur les grands bassins.

Dans le premier cas la crue est due à un orage convectif pendant la saison des pluies. Si on met à part les zones de haute altitude ces averses varient, pour la plupart de leurs caractéristiques, d'une région à l'autre: la hauteur pour la fréquence décennale par exemple est comprise en général entre 100 et 160 mm. La hauteur mais non l'intensité est plus forte sur le littoral de l'Océan Atlantique où elle atteint souvent 200 mm et plus et il semble que souvent cette hauteur diminue avec l'altitude à partir de 700 à 800 m pour la même fréquence. Mais cette averse arrivée au sol peut rencontrer des conditions extrêmement variables qui sont à rapprocher du caractère de diversité sur lequel on a insisté au début de ce rapport. En ce qui concerne la couverture végétale il n'y a pas en région tropicale humide que la forêt dense et la savane boisée dense, il y a aussi la pseudosteppe ou la savane qui souvent couvre mal le sol, et les cultures qui le couvrent au moins aussi mal pour beaucoup de cultures mécanisées et dans certaines régions pour les cultures traditionnelles. Il y a aussi des différences énormes dans la perméabilité des sols, enfin la pente si elle est faible sur une bonne partie de la région peut être forte en montagne et jouer un grand rôle dans l'écoulement.

Il n'y a pas eu de programme général de recherche sur bassins représentatifs pour l'ensemble de la région mais ceux qui ont été étudiés dans certains des pays concernés permettent de donner quelques indications.

Si on considère le débit spécifique maximal de crue décennale, fréquence facile pour les comparaisons on peut donner une idée de la diversité de ces crues. On a trouvé une valeur minimale de $60 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ pour la superficie standard de 25 km^2 avec pente assez faible sur sables perméables de la région de Pointe Noire, une valeur maximale de 2 à $4000 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ pour un sol imperméable couvert de savane et avec fortes pentes au sud-est du Niari et à l'ouest du Zaïre et $6000 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ en forêt à très forte pente. Si la première valeur doit être courante pour les sols perméables des bassins du

troisième sous groupe de la section irrégularité interannuelle, la seconde valeur maximale doit être reconstruite moins fréquemment sauf dans les régions à culture mécanique sans aucune mesure de conservation de sols dès que la pente devient significative, la troisième valeur maximale en forêt n'est pas très fréquente non plus.

Dans presque tous les cas la forêt réduit fortement le débit de crue décennale. Une étude générale qui ne concerne malheureusement qu'une partie de la zone étudiée a donné les résultats suivants: toujours pour un bassin de 25 km^2 on trouve: $500 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ dans des cas très courants, pour une averse décennale standard de 120 mm, mais on peut trouver deux fois moins pour un sol très perméable. On peut trouver aussi nettement plus; sur un sol imperméable de la zone côtière du Gabon, la même averse standard de 120 mm donnerait pour 25 km^2 un débit spécifique de $1900 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$; sur sol assez imperméable avec très fortes pentes dans les monts de Cristal (Gabon) on trouve $6000 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ on voit que dans ce cas l'effet amortisseur de la forêt est très faible on le vérifiera dans une certaine mesure sur les grands bassins.

La perméabilité du sol joue un grand rôle: en savane boisée près de Bangui le débit de crue décennale pour 25 km^2 n'est que de 400 à $500 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. On a vu plus haut le cas de sol particulièrement imperméable en forêt.

Malheureusement on ne dispose que de très peu de données sur l'action de l'homme sur les crues de petits bassins. Signalons simplement que dans la région de Brazzaville avec pentes modérées on trouve pour 25 km^2 un débit de crue décennale de 400 à $600 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ pour une région urbanisée de façon traditionnelle avec une forte proportion de terre battue, la même surface couverte de forêt présenterait probablement un débit spécifique de 2 ou $300 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Une culture mécanisée sur les mêmes pentes sans précaution contre le ruissellement conduirait à des débits spécifiques sûrement inférieurs à $5000 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ mais sûrement supérieurs à $1000 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. La pente dans ce cas joue un rôle capital. Le débit spécifique de crue décennale décroît plus ou moins rapidement lorsque la surface croît. Peu d'études systématiques ont été faites à ce sujet dans la région. Citons deux formules applicables au bassin de la Sanaga au Cameroun (savane tropicale de transition 1000 m d'altitude) et évaluant le débit de crue décennale Q en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ en fonction de la surface S en km^2 (Dubreuil et al., 1975):

zone à forte pente voisine de la dorsale $Q = 0.93 S^{0.76}$

reste du bassin de la Sanaga $Q = 0.22 S^{0.86}$

Ces formules sont valables de 1000 à 100 000 km^2 mais en général il n'y a pas d'études de ce genre et les lois de variation sont très différentes d'un régime à un autre. Indiquons seulement qu'en région forestière, en plaine le débit spécifique varie peu avec la surface, il est d'ailleurs assez faible à l'amont.

Sur les données de crues décennales qui figurent dans le tableau 1 la très grande majorité correspond à des bassins de plusieurs milliers de km^2 au moins. Pour la gamme 200 à 3000 km^2 on sait peu de chose; les débits sont intermédiaires entre ceux qui ont été présentés pour les petits bassins et ceux que l'on va considérer mais

dans le premier cas la diversité est extrêmes. Seuls le Tomi, la Foulakari, la Lokoundjé, la Lobé et le Bangoran correspondent à cette catégorie, les débits spécifiques varient entre 22 et $260 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ mais on trouverait certainement beaucoup plus, entre 500 et 1000 (?) pour un bassin tel que la Comba avec 1200 km^2 au lieu de 90. La diversité doit être très grande.

Sur des bassins dépassant 3000 km^2 les débits de crue décennale varient entre 1 et $230 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$. Comme pour les débits moyens annuels on peut distinguer plusieurs cas. Eliminons le cas de la Lukuga dont le bassin est en partie semi aride et régularisé par le lac Tanganika. On retrouve avec une série de valeur de 10 à $15 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$, le sud-est du bassin du Zaïre, l'est de la région considérée (Kenya, Ouganda), le nord-est du bassin de l'Oubangui; dans cette catégorie le Nil à l'aval du lac Kyoga régularisé par le lac Victoria a un débit spécifique de crue décennale très faible 2.8 et la Kafu à bassin très plat présente également une valeur anormalement faible 6.5. Un grand nombre de valeurs sont comprises entre 20 et $40 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$, si on élimine les très grands bassins, ce sont des régions recevant des précipitations modérées et à pente modérée. Si la pente devient forte le débit spécifique dépasse $60 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ et peut atteindre $218 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour le Wouri (au Cameroun) et 230 pour la Mbéré (au sud du Tchad). Toutes choses restant égales il semble que dans les régimes tropicaux le débit de crue soit nettement plus élevé que dans les régimes équatoriaux. Dans le cas de fortes précipitations, plus de 1800 mm par an, en plaine le débit spécifique tend à dépasser $40 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$; on trouve $56 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour l'Ivindo et $61 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour l'Ogooué. Sur les bassins à sol très perméable le débit spécifique sans atteindre de fortes valeurs reste soutenu, 30 à $45 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$, la valeur un peu faible $24 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ du Kwango s'explique par la grande longueur de cette rivière. En général ces diverses caractéristiques sont assez peu différentes de celles que l'on rencontre dans l'Afrique de l'Ouest; comparées aux régions tropicales humides avec cyclones des débits spécifiques maximaux de 218 ou $230 \text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour 7 à 8000 km^2 sont assez faibles.

Distribution statistique des crues

Dans ce cas également il est fréquent de trouver une distribution proche de la loi de Gauss comme pour les débits moyens annuels, on trouve même quelquefois des distributions avec un faible coefficient d'asymétrie négatif. On doit rappeler que pour beaucoup de cours d'eau de ces régions, il y a une corrélation acceptable entre le débit maximum annuel et le débit moyen annuel. Pour certains régimes équatoriaux on doit considérer l'année hydrologique pour le calcul du débit moyen annuel (ceci n'est pas valable pour les bassins trop petits). Cette corrélation est fort utile pour compléter les séries de données. Il n'y a pas d'étude systématique de l'irrégularité temporelle des crues annuelles mais comme pour les débits moyens annuels plus le bassin est mal arrosé plus le coefficient de variation est élevé. En général on trouve des coefficients de variation faibles: 0.12 à 0.16 sur le bassin de la Sanaga, 0.10 à 0.12 sur les sables du Kalahari. Mais les régions à précipitation déficitaire s'il n'y a pas de grands lacs présentent un coefficient de variation beaucoup plus élevé supérieur à 0.3 et dans certains cas

à 0.4 avec des distributions qui ne sont plus Gaussiennes et un coefficient d'asymétrie positif. De façon générale le coefficient K 3 pour les débits de crue est assez comparable au même coefficient pour les débits moyens annuels. Avec des distributions presque normales la croissance des valeurs maximales est modérée lorsque croît la période de retour. Si on considère le Zaïre à Kinshasa le débit de crue décennale est égal à $65\,500\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ soit $17.5\text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$. On peut sur la distribution des valeurs maximales annuelles reprendre ce qui a été dit pour les débits moyens annuels avec une précision supplémentaire: le débit tout à fait exceptionnel du maximum de 1961 près de $80\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ correspond en grande partie au caractère exceptionnel de la crue sur la partie orientale du bassin sans oublier que sur l'Oubangui la crue a présenté une fréquence inférieure à la fréquence décennale et que sur la Sangha sa période de retour est de 3 ans. Sur le Nil Blanc c'est également un maximum tout à fait exceptionnel que l'on retrouve à Assouan bien qu'il soit difficile de préciser le maximum de 1961 à cette station, il est nettement inférieur cependant au maximum connu de 1878 ce qui tendrait à écarter l'hypothèse d'une période de retour à Kinshasa supérieure à 1000 ans comme ceci a déjà été annoncé. On doit rappeler encore une fois que pour les valeurs maximales annuelles comme pour les débits moyens annuels la distribution statistique est beaucoup moins simple qu'il n'apparaît à première vue et ceci pour des raisons physiques relativement aisées à mettre en évidence. Le problème des pseudo-cycles se pose de la même façon.

En conclusion si on met à part les très petits bassins et certains bassins de superficie moyenne (quelques milliers de km^2) en montagne avec forte précipitations, les crues de cette région sont beaucoup plus modérées que celles des régions tropicales à cyclones surtout si on considère des périodes de retour inférieures à 30 ou 50 ans.

Débits minimaux annuels

Dans les régions les moins arrosées à la limite du régime tropical humide et dans les régions équatoriales déficitaires telles que les bassins derrière la chaîne du Mayombe, ou bon nombre de bassins à l'est du Rift Africain, il n'y a pas écoulement permanent pour les très petits cours d'eau, il en est de même pour les sols très perméables. Mais en général il y a écoulement permanent même pour les petits bassins en régime tropical de transition avec précipitations annuelles supérieures ou égales à 1500 mm et en régime équatorial. En régime tropical de transition la courbe de tarissement est nette et souvent régulière. Il en est de même au début de la saison sèche principale pour le régime équatorial de transition austral. Mais ce tarissement peut être perturbé par des pluies tardives surtout dans les régions à fortes précipitations comme sur la Lova.

Pour l'analyse des débits de basses eaux on a considéré le débit caractéristique d'étiage, débit qui est dépassé pendant 355 jours. Ce débit a fait l'objet de déterminations précises ou d'estimations parfois grossières pour 59 stations. On trouve des valeurs inférieures à $1\text{ l s}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour neuf stations correspondant à des rivières à régime tropical de transition en plaine, ou avec faibles précipitations et pour des rivières à régime équatorial déficitaire de l'est de la région. Il conviendrait d'ajouter à ce groupe le Nil à l'aval du

lac Kyoga régularisé par le lac Victoria et la Lufira également régularisée. Le débit caractéristique d'étiage est généralement compris entre 1 et 2 l s⁻¹km⁻² en régime tropical de transition dès que la hauteur de précipitations annuelle dépasse 1500 à 1600 mm. Ce sont les mêmes chiffres que l'on trouve dans les régions comparables de l'Afrique de l'Ouest. Mais dans certains cas il peut atteindre 3 ou 4 l s⁻¹km⁻² par exemple sur la Mbali dans la région de Bangui ou le bassin perméable constitue des réserves. En régions équatoriales non déficitaires le débit d'étiage est compris entre 3 et 6 l s⁻¹km⁻² mais dans le cas de précipitations annuelles très abondantes il peut être plus élevé: 8 l s⁻¹km⁻² pour l'Ogooué, 7.4 pour le Wouri, 10.3 pour la Nyanga, 16 à 17 (?) pour la Lova et l'Ulundi. Il atteint des valeurs remarquables si les conditions géologiques sont favorables 7.9 l s⁻¹km⁻² sur la Lobaye et surtout 20 à 30 l s⁻¹km⁻² pour les cours d'eau des sables du Kalahari. Ceci est moins visible pour le Kwango qui ne draine pas que des régions perméables. En ce qui concerne le fleuve Zaïre son débit caractéristique d'étiage est de 25 000 m³s⁻¹ environ soit 6.67 l s⁻¹km⁻² à Kinshasa, valeur nettement relevée par les débits élevés des sables du Kalahari, et 4400 m³s⁻¹ soit 4.55 l s⁻¹km⁻² à Kisangani après que la Lova, l'Ulundi et d'autres affluents aient relevé le débit de 800 m³s⁻¹ à Kindu. Pour la majeure partie de la région étudiée les débits d'étiage sont soutenus et parfois très élevés mais les distributions ne sont plus Normales (loi de Galton ou autres).

EROSION ET TRANSPORTS SOLIDES

Dans presque tous les cas il n'y a pratiquement pas d'érosion en forêt tropicale mais on ne peut pas en dire autant pour les zones de savanes qu'elles soient situées dans des bassins à régime tropical de transition ou à régime équatorial. Pour le premier cas nous citerons les résultats obtenus sur le bassin de la Sanaga dans les savanes des plateaux de l'Adamaoua: pour le Mbam à Goura 42 300 km² la concentration maximale est de 200 g m⁻³, les transports solides sont en moyenne de 2 200 000 t par an pour un débit moyen annuel de 715 m³s⁻¹. Ils croissent de avril à juillet le maximum étant situé deux mois avant le maximum du débit. Puis ils décroissent régulièrement jusqu'en novembre fin de la période de hautes eaux. Ils décroissent alors très brutalement. La dégradation spécifique est de 28 t km⁻² ou km⁻¹. En fait elle est nettement plus élevée, une partie des produits érodés se déposent soit sous forme de colluvions au bas des pentes, soit au voisinage des confluent dans les plaines d'inondation. Sur le Djerem à Mbakaou (20 390 km²) avec un débit moyen annuel de 404 m³s⁻¹ la masse de transport solide a été évaluée à 1 400 000 t correspondant à une dégradation spécifique de 70 t km⁻² ou beaucoup plus élevés. A l'extrémité est de la région qui nous concerne des études de transports solides ont été faites sur le Nyando (2700 km² débit moyen annuel 15.2 m³s⁻¹) elles ont mis en évidence des concentrations en sédiments atteignant 1000 g m⁻³ ce qui conduirait à une dégradation spécifique triple ou quadruple de celle observée sur le Mbam, il est vrai que la savane doit couvrir plus mal. Les savanes de la vallée du Niari au Congo doivent également présenter une forte dégradation spécifique. Enfin dans certains sables tels que

ceux de la série des cirques près du littoral de l'Atlantique on trouve comme leur nom l'indique des "lavaka" d'érosion comme à Madagascar.

Bien que la grande majorité des rivières présentent des transports solides très modestes il apparaît dès que l'on détruit la forêt et que l'on met en culture des problèmes d'érosion souvent difficiles à résoudre sauf si la pente est insignifiante, mais pour l'érosion comme pour les débits de crues le manque d'étude systématique de l'influence de l'homme se fait cruellement sentir.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans l'ensemble cette partie de l'Afrique tropicale présente des caractéristiques favorables pour l'aménagement des eaux et en particulier pour la production d'énergie électrique dès que la dénivelée disponible le permet: débits relativement abondants, abondants et souvent même très abondants, irrégularité interannuelle des débits faible ou même très faible, étiages soutenus et parfois élevés, transports solides peu importants. Il y a là en réserve un énorme potentiel pour la production d'énergie électrique dont une faible partie a été aménagée jusqu'ici. Il y a aussi un beau réseau de voies navigables qui a rendu de très grands services et continuera à en rendre. Il y a enfin des possibilités d'irrigations pour la plupart des régions qui en auraient besoin. Malheureusement il y a encore beaucoup à faire pour faciliter les études hydrologiques des aménagements à venir et nous présentons ci-après un certain nombre de recommandations à ce sujet.

(a) Il existe pour l'ensemble de la République du Zaïre une masse d'informations considérables et souvent de bonne qualité sur les variations de hauteurs d'eau pour un très vaste réseau hydrométrique. Il faudrait pouvoir valoriser ces données en faisant un effort particulier pour l'étalonnage d'un nombre limité de stations. Avec une vingtaine de stations en plus de celles qui sont déjà étalonnées on augmenterait dans de très larges mesures les connaissances hydrologiques pour des rivières dont le régime des débits est mal connu comme l'Ulundi la Lova ou le Ruki par exemple. Il suffirait de quelques campagnes de mesure. Plus cette opération tardera moins il sera facile de retrouver des repères de nivellement.

(b) La crue de 1961 dont la connaissance est capitale pour l'hydrologie d'une bonne partie de la région n'est connue qu'à un petit nombre de stations du Zaïre. Une enquête minutieuse permettrait souvent une estimation valable des hauteurs d'eau atteintes. Cette opération est urgente elle aussi.

(c) Les réseaux hydrométriques doivent être suivis de façon très régulière, de sérieuses économies peuvent être faites, le principe de Langbein des stations secondaires s'applique très bien dans ce cas. Une dizaine d'années d'observations, parfois moins, suffisent pour ces stations. La télétransmission peut résoudre dans bien des cas le problème des observateurs. Mais de toutes façons l'exploitation des réseaux restera assez difficile et coûteuse. Certains pays n'auront pas la possibilité de la faire sans assistance technique et financière.

(d) La modification de la couverture végétale peut changer



radicalement les caractéristiques des crues, de l'érosion et des transports solides. Des recherches à l'échelle de la parcelle des bassins expérimentaux et de petits bassins homogènes avec action de l'homme vérifiée par satellites devraient être intensifiées avec un programme précis débouchant sur des résultats pratiques.

(e) Dans les programmes de recherches concernant le climat et ses variations, un effort devrait être fait pour une meilleure compréhension des mécanismes qui sont à la base des séries d'années sèches et humides et pour leur prévision à moyen terme.

REFERENCES

- Billon, B., Guiscafne, J., Herbaud, J. & Oberlin, G. (1976) Le Bassin du fleuve Chari. *Monographie Hydrologique ORSTOM no. 2*. ORSTOM, Paris.
- Devroey, E.J. (1948) Observations hydrographiques du bassin Congolais (1932-1947). *Mémoires de l'IRCB. Section de Séances Techniques*, tome 5, fascicule 1, Bruxelles.
- Devroey, E.J. (1951) *Observations Hydrographiques au Congo Belge et au Ruanda-Urundi (1948-1950)*. Publication no. 1 du Comité Hydrographique du Bassin Congolais, Bruxelles.
- Devroey, E.J. (1952-1961) *Annuaire hydrologiques du Congo Belge et Ruanda-Urundi (1951-1959)*. Publications du Comité Hydrographique du Bassin Congolais, Bruxelles.
- Dubreuil, P., Chaperon, P., Guiscafne, J. & Herbaud, J. (1972) *Recueil des Données de Base des Bassins Représentatifs et Expérimentaux*. ORSTOM, Paris.
- Dubreuil, P., Guiscafne, J., Nouvelot, J.F. & Olivry, J.C. (1975) Le bassin de la rivière Sanaga. *Monographie Hydrologique ORSTOM no. 3*. ORSTOM, Paris.
- Hurst, H.E., Black, R.P. & Simaika, Y.M. (1931-1960) *The Nile Basin*, vols 1-10. Government Printing Office, Cairo, Egypt.
- Lempicka, M. (1971) *Bilan Hydrique du Fleuve Zaïre. Ière Partie Ecoulement du bassin 1950-1959*. Office National de la Recherche et du Développement, Kinshasa.
- N. (1951-1959) *Annuaire Hydrologiques de la France d'Outre-Mer*, première série 1949-1957. ORSTOM, Paris.
- N. (1960-1966) *Annuaire Hydrologiques de l'ORSTOM, 1958-1963*. ORSTOM, Paris.
- N. (1967-1979) *Annales Hydrologiques de l'ORSTOM, 1968 et 1969, 1970 à 1973*. ORSTOM, Paris.
- Roche, M.A. (1982) Evapotranspiration réelle de la forêt Amazonienne en Guyane. *Cah. ORSTOM, Série Hydrol. XIX (1)*.
- Rodier, J. (1964) Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. *Mémoire ORSTOM no. 6*. ORSTOM/Gauthier Villars, Paris.
- Rodier, J. (1976) Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Etude préliminaire pour le CIEH. *Cah. ORSTOM, Série Hydrol. XIII (4)*.
- UNDP-WMO (1974) *Hydrometeorological Survey of the Catchments of Lakes Victoria, Nyoga and Albert*, vol. I, II, III, IV. RAF 66-025 Technical Report no. 1 WMO.
- Données inédites fournies par F.Bultot, H.Charanja, A.Chouret, J.Lerique, M.Molinier, P.Pourrut, J.V.Sutcliffe, etc.