

ACADEMIE ROYALE DES SCIENCES D'OUTRE-MER

Classe des Sciences techniques
Mémoires in-4°, t. VI, fasc. 2, Bruxelles, 1987

**Niveaux et débits
du fleuve Zaïre à Kinshasa**
(Régime - Variabilité - Prévision)

par

F. BULTOT ET G.L. DUPRIEZ

Section Hydrologie de l'Institut Royal Météorologique de Belgique

KONINKLIJKE ACADEMIE VOOR OVERZEESE WETENSCHAPPEN

Klasse voor Technische Wetenschappen
Verhandelingen in-4°, Boek VI, afl. 2, Brussel, 1987

L.S.,

Uw boek is van de pers gekomen.
Ziehier een eerste exemplaar.
Hoogachtend.

Votre livre est sorti de presse.
Voici un premier exemplaire.
Courtoisement vôtre.

Your book has just come out.
This is a first copy.
Yours sincerely.

Ihr Buch ist von der Presse gekommen.
Anbei finden Sie ein erstes Exemplar.
Hochachtungsvoll.

ceuterick



TEL. 016 / 22 81 81
TELEX : 25618 Ceutri B
Postbox 24

ACADEMIE ROYALE DES SCIENCES D'OUTRE-MER

Classe des Sciences techniques
Mémoires in-4°, t. VI, fasc. 2, Bruxelles, 1987

**Niveaux et débits
du fleuve Zaïre à Kinshasa**
(Régime - Variabilité - Prévision)

par

F. BULTOT ET G.L. DUPRIEZ

Section Hydrologie de l'Institut Royal Météorologique de Belgique

KONINKLIJKE ACADEMIE VOOR OVERZEESE WETENSCHAPPEN

Klasse voor Technische Wetenschappen
Verhandelingen in-4°, Boek VI, afl. 2, Brussel, 1987

Mémoire présenté par M. F. BULTOT à la séance de la
Classe des Sciences techniques tenue le 30 mai 1986

ACADÉMIE ROYALE
DES
SCIENCES D'OUTRE-MER

Rue Defacqz 1 boîte 3
B-1050 Bruxelles
Tél.: (02) 538.02.11

KONINKLIJKE ACADEMIE
VOOR
OVERZEESE WETENSCHAPPEN

Defacqzstraat 1 bus 3
B-1050 Brussel
Tel.: (02) 538.02.11

D/1987/0149/1

TABLE DES MATIÈRES

Résumé — Samenvatting — Summary	5
Introduction	7
1. Bassin versant	7
2. Cotes hydrométriques	10
Régime annuel	11
Fréquences des niveaux hauts et bas	16
3. Courbe de tarage	21
4. Débit	24
Régime annuel	24
Débits caractéristiques	25
Fréquences des hauts et bas débits	26
5. Ecoulement	29
6. Crues	29
7. Récurrence et périodicité de la série 1903-1983 des débits moyens mensuels	31
Persistence	31
Stationnarité	31
Variations cycliques	35
Caractère représentatif de la série de référence 1903-1983	38
8. Modèle de prévision du débit moyen mensuel	39
Description du modèle	39
Adéquation du modèle	41
Fiabilité des prévisions	41
Références	49

NIVEAUX ET DÉBITS DU FLEUVE ZAÏRE À KINSHASA (Régime – Variabilité – Prévision)

RÉSUMÉ. — La première partie du mémoire est une synthèse des résultats obtenus par une analyse statistique classique de la série 1903-1983 des cotes hydrométriques journalières à Kinshasa-Est et d'une série de 85 mesures de débits. Sur cette base de référence déjà large, elle fournit une information fiable et relativement précise sur le régime et la variabilité du niveau, du débit et de l'écoulement du fleuve Zaïre à Kinshasa ainsi que sur l'évolution des paramètres statistiques. Dans la seconde partie, on présente un modèle de prévision du débit mensuel moyen à des échéances de 1 à 12 mois. Ce modèle, qui pourrait être opérationnel à peu de frais, semble suffisamment performant pour être utilisé avec profit par les services responsables de la navigation sur le bief maritime en aval de Kinshasa.

SAMENVATTING. — *Peilen en debieten van de Zaïre stroom te Kinshasa (regime, variabiliteit, voorspelling)*. — Het eerste deel van de verhandeling is een synthese van de resultaten bekomen door een klassieke statistische analyse van de reeks 1903-1983 van de dagelijkse waterstanden te Kinshasa-Oost en van een reeks van 85 debietsmetingen. Op basis van deze reeds brede referentie-documentatie levert zij betrouwbare en relatief nauwkeurige inlichtingen over het regime en de variabiliteit van het peil, van het debiet en van de afvoer van de Zaïre stroom te Kinshasa evenals over de evolutie van de statistische parameters. In het tweede deel brengt men een voorspellingsmodel voor een termijn van 1 tot 12 maanden van het gemiddelde maandelijks debiet. Dit model, dat met geringe kosten operationeel zou kunnen worden, schijnt voldoende goed te werken om met vrucht gebruikt te worden door de diensten verantwoordelijk voor de scheepvaart op het maritiem gedeelte stroomafwaarts van Kinshasa.

SUMMARY. — *Stages and discharges of the river Zaïre at Kinshasa (regime, variability, forecast)*. — The first part of the paper is a synthesis of the results inferred from a classical statistical analysis of the 1903-1983 series of the daily river stages at Kinshasa-East and of a series of 85 discharge measurements. Founded on this fairly wide reference basis, the synthesis yields reliable and relatively precise information about the regime and the variability of the stage, the discharge and the streamflow of the river Zaïre at Kinshasa as well as about the evolution of the statistical parameters. The second part deals with a model for forecasting the monthly mean discharge with lead times of 1 to 12 months. This model, which could be operational at low cost, seems sufficiently performing for advantageous use by the Services responsible for the navigation on the maritime reach downstream from Kinshasa.

Introduction

La première partie du mémoire consiste en une analyse statistique classique de la longue série 1903-1983 des hauteurs et débits du fleuve Zaïre à Kinshasa. La série chronologique de référence est persistante, non stationnaire et apparemment cyclique. Ces caractéristiques doivent être prises en considération dans l'interprétation des statistiques générales et dans la conception de tout modèle de prévision hydrologique.

La seconde partie du mémoire est consacrée précisément à l'exposé d'un modèle auto-régressif de prévision du débit moyen mensuel à des échéances de 1 à 12 mois. Ce modèle peut être opérationnel à peu de frais parce qu'il n'utilise aucune variable exogène. Il est capable de prévoir les débits moyens mensuels avec une précision qui, dans la plupart des cas, est très acceptable compte tenu de l'échéance et bien suffisante pour l'usage escompté. Le but immédiat d'une telle prévision est en effet de renseigner les autorités responsables de l'entretien des passes navigables dans le bief maritime du fleuve Zaïre, à quelque 350 km en aval de Kinshasa (voir carte 1b). Les érosions et ensablements parfois rapides qui s'y manifestent sont directement liés à la vitesse du courant et à la capacité de l'eau à transporter du sédiment (MATEBA 1982). On conçoit dès lors que les services qui s'occupent de la planification des opérations de dragage pourraient tirer profit de prévisions à un ou quelques mois de l'évolution du débit du fleuve, même à quelque 10 pour-cent près. Etant donné que le coût du dragage est élevé et que l'utilisation opérationnelle du modèle n'occasionnerait que des frais insignifiants, le bénéfice réalisable a toutes chances d'être substantiel.

* * *

Les auteurs expriment leur reconnaissance à leur collègue, le Prof. F. De Meyer, qui les a aidés de ses conseils en matière d'analyse spectrale et leur a permis d'utiliser ses programmes de calcul.

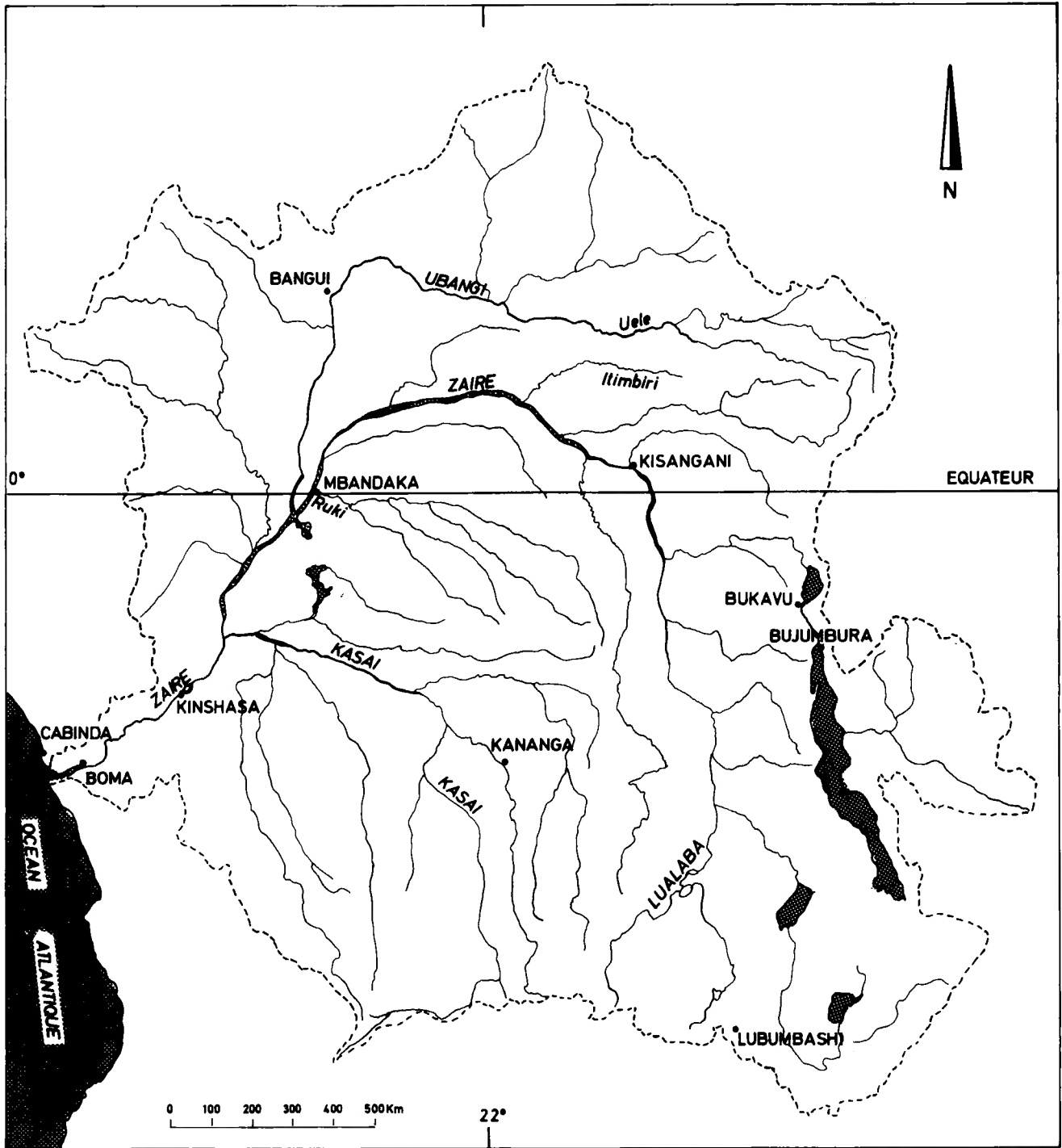
Ils réitèrent volontiers aussi leurs remerciements au Prof. J. J. Peters qui a très obligeamment mis à leur disposition la série homogénéisée 1903-1983 des cotes hydrométriques du Zaïre sur bande magnétique.

Ils ont plaisir enfin à exprimer leur appréciation à leur collaborateur, Monsieur D. Gellens, pour ses judicieuses remarques et suggestions.

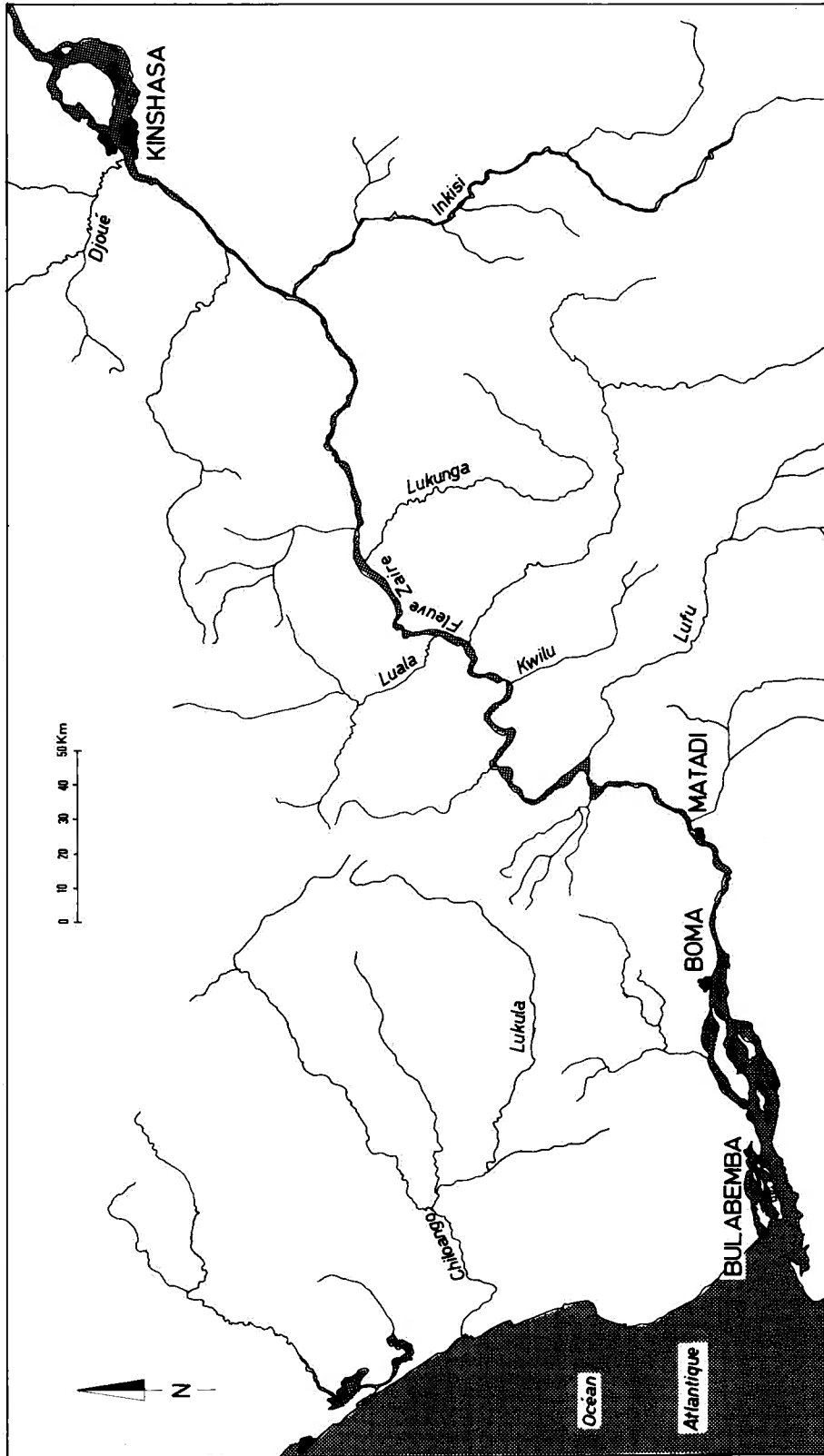
1. Bassin versant

Le bassin versant du Zaïre à Kinshasa s'étend entre les parallèles 9° 15' N et 13° 28' S et entre les méridiens 15° 18' E et 34° 02' E. Il a une superficie de 3 747 320 km². Un tiers environ du bassin se trouve dans l'hémisphère nord, les deux autres tiers dans l'hémisphère sud.

Les caractéristiques physiographiques du bassin sont décrites dans la notice relative à la Carte des eaux superficielles (DEVROEY 1951).



CARTE 1. — Bassin hydrographique du fleuve Zaïre.



CARTE 2. — Détail du cours inférieur du fleuve Zaïre.

2. Cotes hydrométriques

La série de référence est la série des cotes hydrométriques journalières de la période 1903-1983.

Pour la période postérieure à 1925, les données proviennent des observations effectuées à l'échelle limnimétrique du port public à Kinshasa-Est. Cette échelle, qui a été installée en 1925, est située à 15° 18' 30" long. E, 4° 17' 45" lat. S; la cote absolue du zéro de l'échelle est 272,12 m au-dessus du niveau moyen de l'océan Atlantique (nivellement IGC 1955).

Pour la période 1903-1925, les données exploitées sont basées sur les observations de

TABLEAU 1. - MOYENNES, MAXIMA ET MINIMA MENSUELS ET ANNUELS DE LA COTE HYDROMETRIQUE (en m).

Période 1903-1983

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNEE
<i>Moyennes mensuelles et annuelles:</i>													
Moyenne	3,20	1,99	1,60	1,93	2,19	1,86	1,16	1,08	1,83	2,72	3,70	4,13	2,28
Ecart-type	,75	,70	,62	,68	,75	,76	,67	,54	,51	,53	,57	,69	,52
Coef. var.	,23	,35	,39	,35	,34	,41	,58	,51	,28	,19	,15	,17	,23
Maximum	5,81	4,63	3,28	3,84	3,91	3,76	2,94	2,74	3,09	3,86	5,02	6,11	3,95
Année	1962	1962	1963	1969	1963	1963	1963	1969	1969	1962	1961	1961	1962
Minimum	1,41	,45	,50	,81	,85	,31	-,32	-,03	,64	1,58	2,46	2,45	1,31
Année	1914	1914	1920	1915	1915	1905	1905	1907	1905	1905	1915	1913	1919
Fractile 95	4,34	3,25	2,87	3,19	3,62	3,34	2,52	1,93	2,59	3,64	4,64	5,08	3,21
Fractile 90	4,17	2,97	2,57	2,91	3,19	3,07	2,10	1,80	2,43	3,35	4,49	4,86	3,04
Fractile 80	3,75	2,42	2,09	2,57	2,90	2,52	1,65	1,44	2,20	3,17	4,13	4,75	2,64
Médiane	3,20	1,94	1,50	1,78	2,01	1,73	1,07	1,13	1,92	2,82	3,73	4,20	2,27
Fractile 20	2,60	1,52	1,10	1,37	1,56	1,25	,66	,58	1,38	2,30	3,21	3,53	1,88
Fractile 10	2,24	1,22	,90	1,07	1,28	,94	,34	,30	1,07	1,93	2,92	3,22	1,57
Fractile 5	2,10	,96	,75	,93	,98	,70	,04	,24	,91	1,74	2,60	2,83	1,43
<i>Maxima mensuels et annuels:</i>													
Moyenne	3,85	2,45	1,82	2,26	2,39	2,13	1,55	1,43	2,26	3,20	4,12	4,32	4,48
Ecart-type	,74	,78	,63	,74	,73	,72	,77	,51	,52	,55	,63	,68	,60
Coef. var.	,19	,32	,35	,33	,30	,34	,50	,36	,23	,17	,15	,16	,13
Maximum	6,17	5,35	3,69	4,16	4,18	3,88	3,59	3,04	3,30	4,41	5,73	6,26	6,26
Année	1962	1962	1962	1969	1969	1963	1963	1969	1969	1962	1961	1961	1961
Fractile 95	4,89	3,74	2,98	3,59	3,74	3,55	3,22	2,10	3,19	4,19	5,19	5,23	5,50
Fractile 90	4,72	3,50	2,85	3,26	3,30	3,17	2,65	2,00	2,92	3,89	4,83	5,15	5,18
Fractile 80	4,45	3,01	2,30	2,98	3,15	2,73	2,16	1,83	2,67	3,66	4,63	4,93	4,94
Médiane	3,86	2,33	1,67	2,05	2,21	2,01	1,42	1,49	2,36	3,22	4,16	4,43	4,50
Fractile 20	3,29	1,88	1,30	1,60	1,77	1,57	,94	,92	1,77	2,76	3,63	3,72	4,06
Fractile 10	2,87	1,52	1,16	1,40	1,52	1,25	,64	,72	1,50	2,36	3,27	3,34	3,72
Fractile 5	2,55	1,32	,95	1,19	1,32	,98	,36	,57	1,40	2,18	2,85	3,00	3,29
<i>Minima mensuels et annuels:</i>													
Moyenne	2,49	1,64	1,42	1,61	1,97	1,50	,84	,82	1,40	2,28	3,23	3,80	,72
Ecart-type	,79	,66	,64	,65	,76	,81	,62	,59	,52	,52	,55	,69	,58
Coef. var.	,32	,40	,45	,40	,39	,54	,73	,72	,37	,23	,17	,18	,80
Minimum	,76	,30	,36	,55	,56	-,17	-,47	-,29	-,24	1,06	2,04	2,00	-,47
Année	1914	1914	1920	1943	1905	1919	1905	1983	1907	1905	1907	1913	1905
Fractile 95	3,80	2,98	2,79	2,87	3,51	3,12	2,08	1,84	2,11	3,19	4,20	4,75	1,82
Fractile 90	3,60	2,57	2,40	2,68	3,05	2,69	1,65	1,51	2,00	2,95	3,93	4,63	1,41
Fractile 80	3,07	2,09	2,00	2,10	2,70	2,22	1,32	1,21	1,80	2,72	3,71	4,32	1,10
Médiane	2,37	1,58	1,30	1,54	1,75	1,40	,80	,82	1,47	2,37	3,25	3,88	,68
Fractile 20	1,94	1,18	,91	1,08	1,41	,83	,41	,28	,94	1,80	2,78	3,29	,23
Fractile 10	1,53	,85	,64	,82	,93	,54	,13	,03	,61	1,53	2,40	2,82	,02
Fractile 5	1,36	,66	,55	,70	,83	,38	-,23	-,17	,51	1,42	2,22	2,63	-,23

l'échelle limnimétrique installée dans le courant de 1902 à Kinshasa-Ouest, rapportées à l'échelle de Kinshasa-Est située à 8 km en amont.

Les corrections et interpolations, de même que la réduction des données anciennes ont été effectuées par le Professeur J. J. Peters et ses collaborateurs. La série complète 1903-1983 a été publiée récemment (MATEBA 1984).

RÉGIME ANNUEL (tableau 1)

Le niveau moyen mensuel présente un maximum principal (4,13 m) en décembre et un

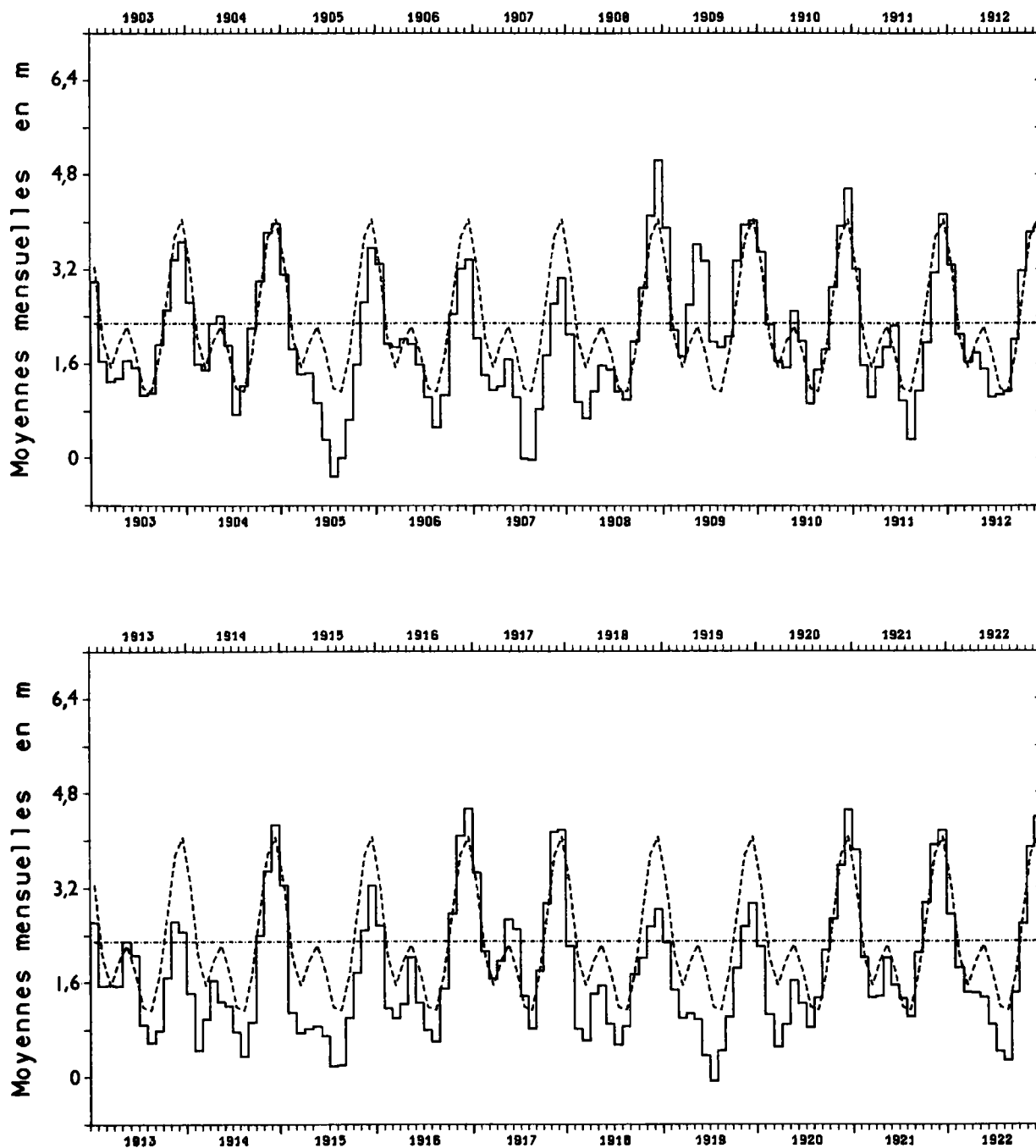
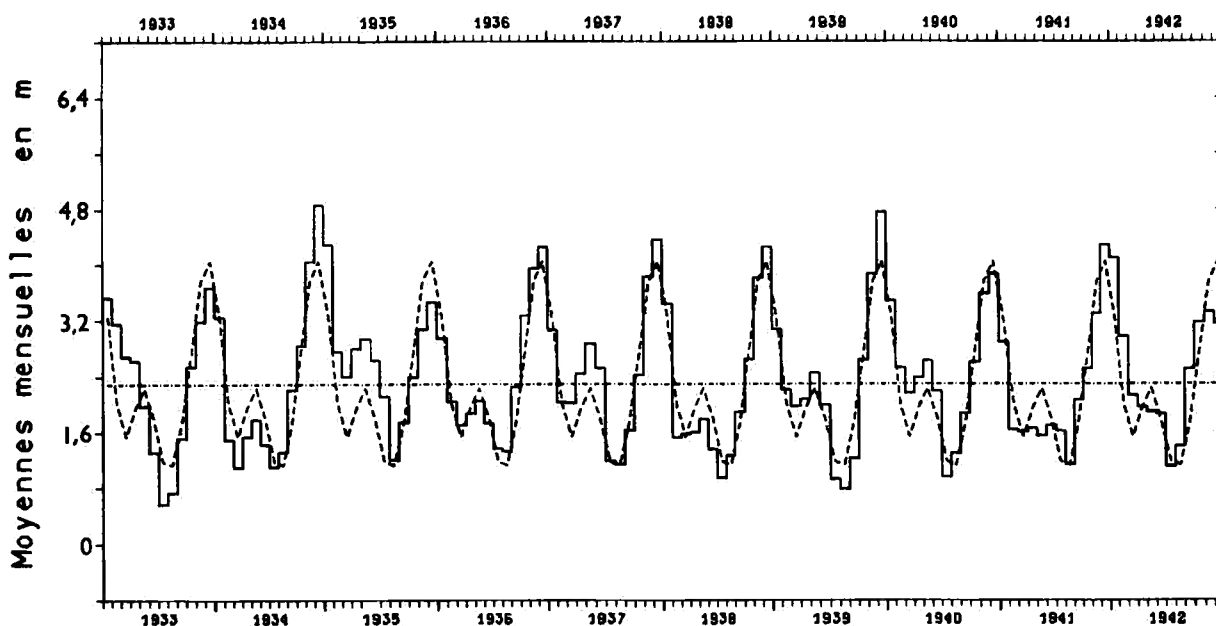
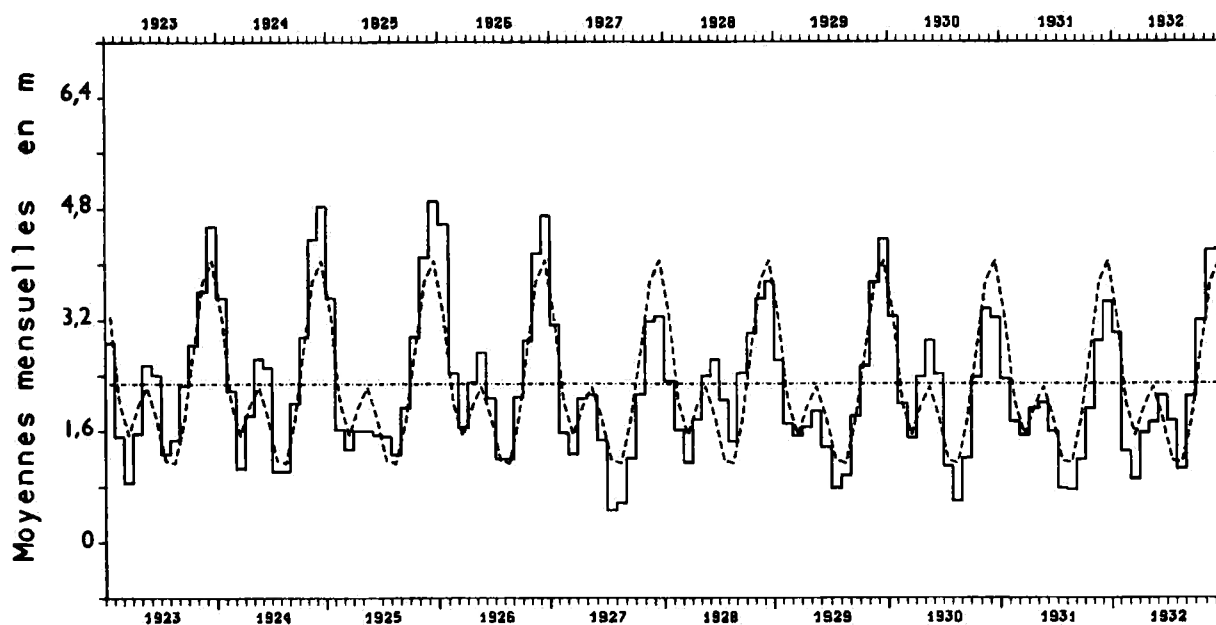


FIG. 1 (pp. 11-14). — Variation des cotes hydrométriques moyennes mensuelles. En traits mixtes: moyenne générale; en trait discontinu: régime moyen annuel.

maximum secondaire (2,19 m) en mai; un minimum principal (1,08 m) en août et un minimum secondaire (1,60 m) en mars.

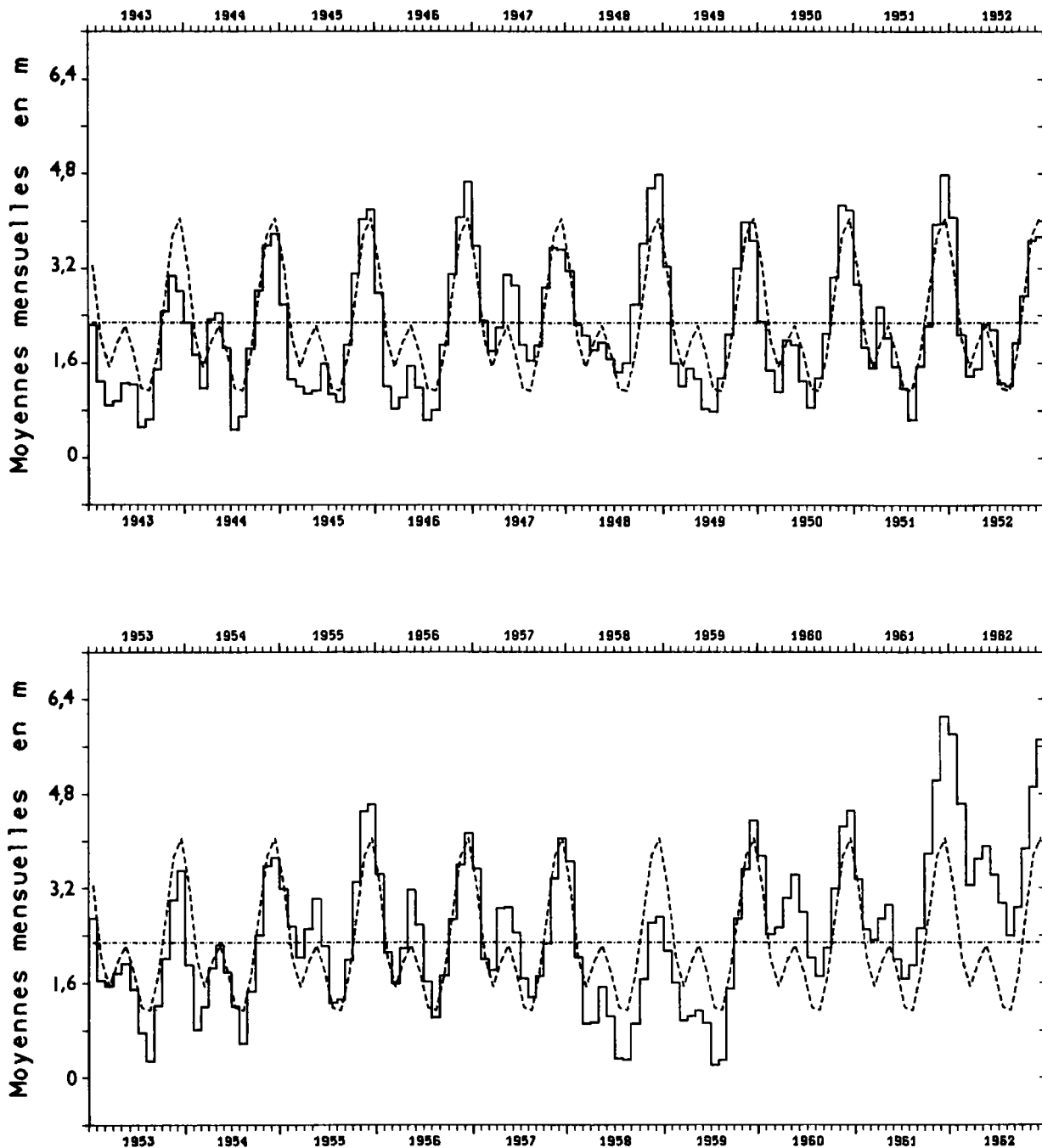
La variabilité interannuelle est particulièrement grande en juillet-août (coefficients de variation de 58 et 51%). Les fractiles observés de la distribution des cotes limnimétriques mensuelles indiquent qu'en juillet par exemple, dans 5% des cas la cote peut descendre sous le seuil de 0,04 m ou dépasser 2,52 m; en janvier, dans 5% des cas aussi, elle peut rester en deçà de 2,10 m ou franchir le seuil de 4,34 m. La cote moyenne mensuelle la plus élevée (6,11 m) a été observée en décembre 1961, la plus basse ($-0,32$ m) en juillet 1905.

Quant à la cote journalière la plus élevée (6,26 m), elle a été relevée le 17 décembre 1961, la plus basse ($-0,47$ m) en juillet 1905.



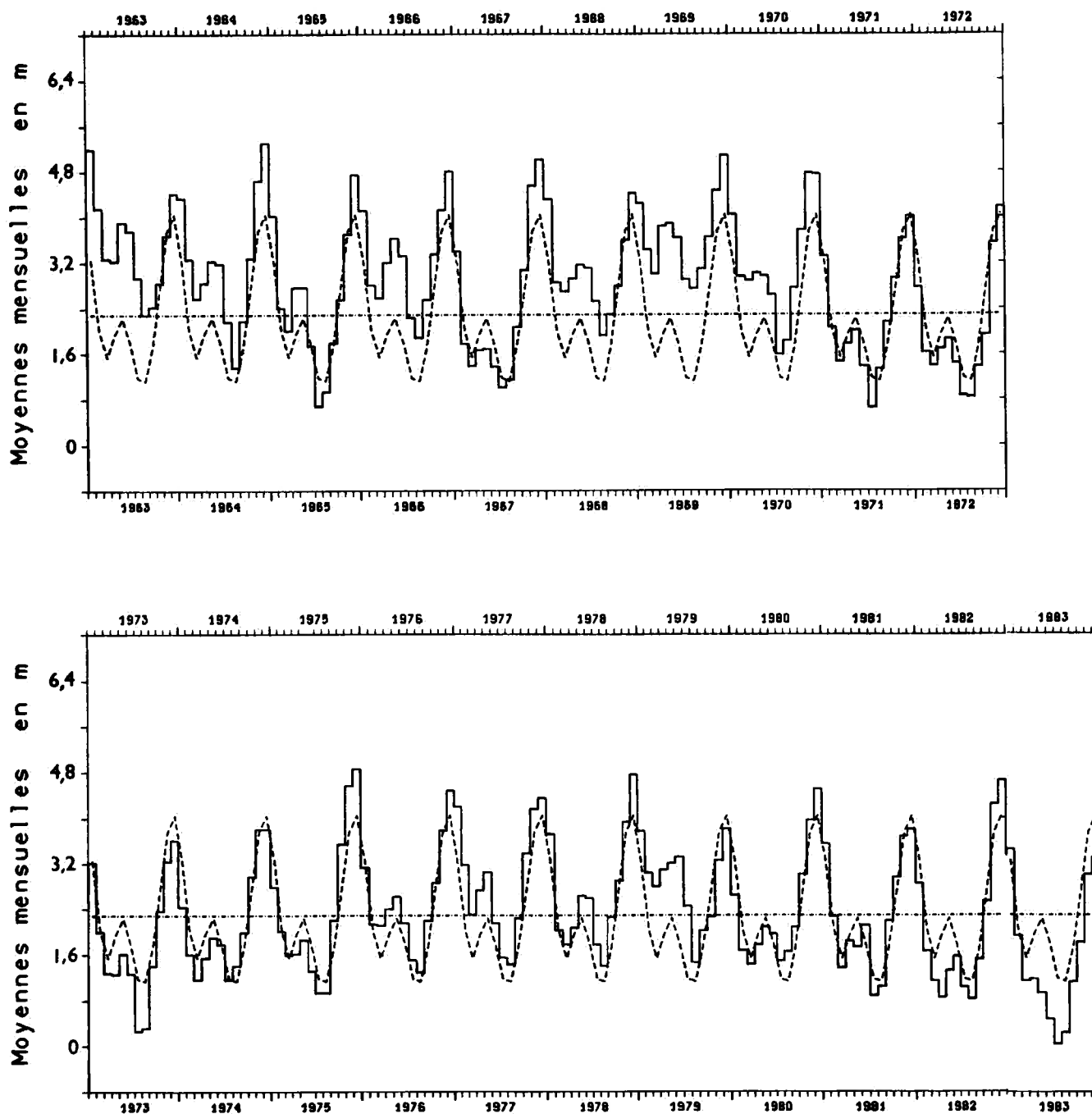
Les courbes de la figure 1 montrent l'évolution des cotes moyennes mensuelles durant toute la période de référence. Afin de déceler les années singulières et de mieux apprécier les fluctuations lentes, on a également reporté sur ces graphiques la moyenne générale (2,28 m) ainsi que la courbe du régime moyen annuel.

La série observée étant suffisamment longue, il est possible de définir le régime annuel non seulement par les valeurs moyennes de chaque jour de l'année mais aussi par leurs enveloppes probabilistes. Les figures 2a et 2b (p. 15) explicitent la méthode de calcul. Les valeurs successives de la moyenne, de la médiane, des extrêmes et des fractiles 5 et 95 de la distribution des cotes observées en fonction de la date y sont représentées en trait plein. Les courbes en trait discontinu résultent d'un ajustement par une série de Fourier. Pour la moyenne, la média-



ne et le maximum, les trois premiers termes sont significatifs et sont utilisés pour le développement de la série; ils contribuent pour 99 % à l'explication de la variance totale. Les courbes du minimum et des fractiles n'utilisent que les deux premières composantes harmoniques, lesquelles représentent d'ailleurs 98 % de la variance totale.

Le régime moyen annuel et ses enveloppes font l'objet de la figure 3. Cette famille de courbes constitue un canevas fort utile pour apprécier le caractère normal ou exceptionnel des hydrogrammes annuels. A titre d'information, quelques années particulières (1905, 1961, 1962, 1983) ont été représentées à la figure 4 (pp. 17 et 18). Sur l'hydrogramme de l'année 1983, on peut voir par exemple que le niveau du fleuve est normal en début d'année. Le tarissement qui suit la crue de janvier est fort important; il se combine avec une réduction de la crue secon-



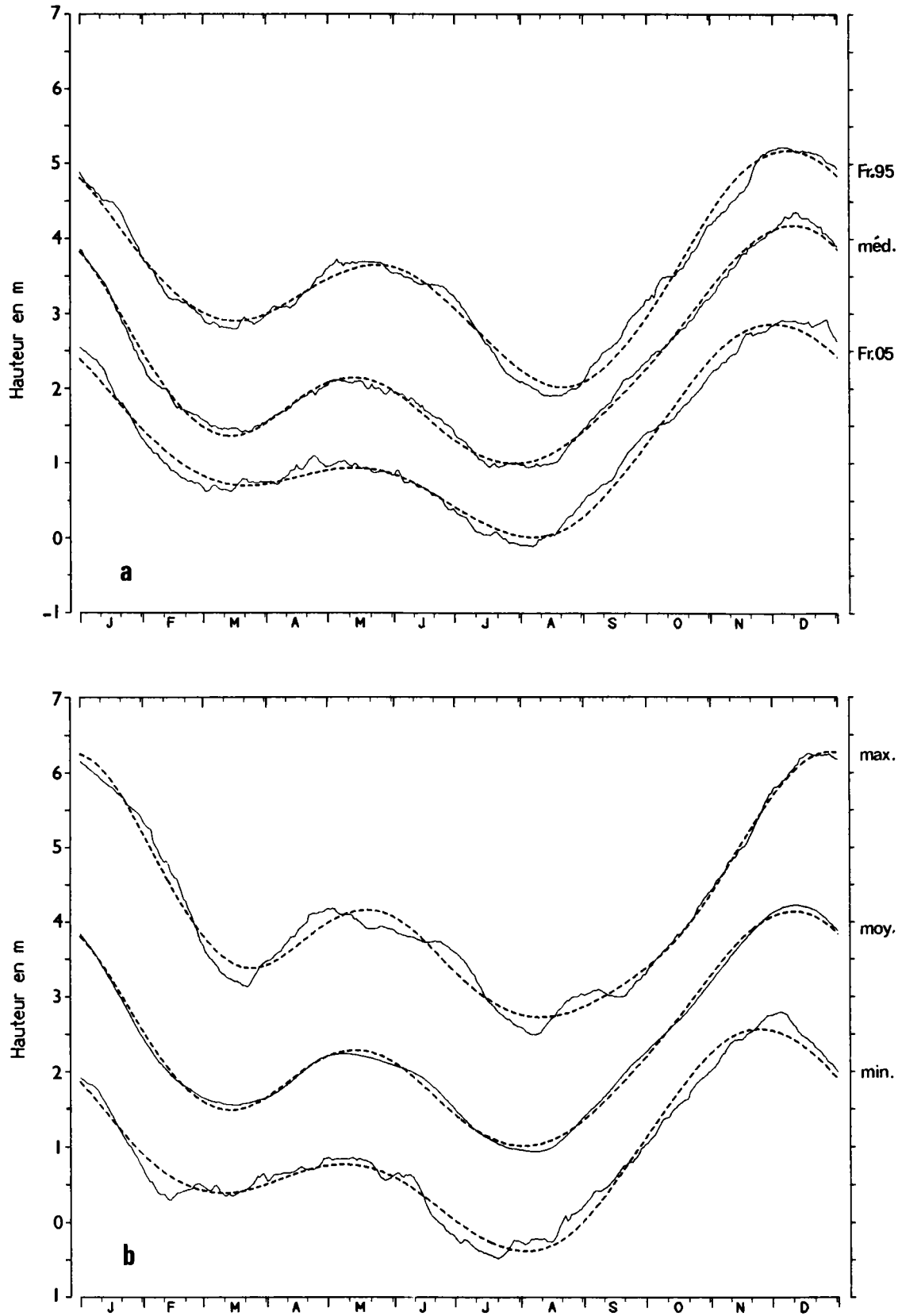


FIG. 2. — Détermination du régime annuel de la cote hydrométrique:
 a) médiane et fractiles 5 et 95
 b) moyenne et extrêmes.

naire de sorte qu'à partir de la mi-mai, les cotes hydrométriques deviennent exceptionnellement basses et se rapprochent des minima absolus. La remontée du niveau s'amorce dès le début du mois d'août mais elle est rapidement ralentie. Du 10 au 25 octobre, les cotes observées sont à nouveau exceptionnellement basses et constituent des minima absolus pour cette époque de l'année.

FRÉQUENCES DES NIVEAUX HAUTS ET BAS (tableaux 2 à 5)

Comme indiqué au tableau 1, la cote maximale annuelle dépassée une année sur deux en moyenne est de 4,5 m. Une année sur dix en moyenne, cette cote est dépassée pendant 15 jours en novembre, 31 jours en décembre et 8 jours en janvier (tableau 2, p. 19). En décembre elle est même dépassée, une année sur cinq en moyenne, pendant 31 jours. Au tableau 2 on trouvera également les fréquences mensuelles et annuelles des jours où la cote hydrométrique dépasse les seuils de 5 m et de 5,5 m. Ce dernier événement est exceptionnel puisqu'il ne s'est présenté que trois fois, lors des crues de 1961-1962, de 1962-1963 et en décembre 1964.

Au tableau 3 sont présentées les caractéristiques des épisodes au cours desquels la cote hydrométrique reste constamment égale ou supérieure aux seuils de référence. On y trouvera notamment les dates de début et de fin, la durée et la cote maximale des 15 épisodes les plus longs rangés par ordre décroissant de leur durée.

On remarquera encore que ces épisodes de hautes eaux sont peu fréquents mais de longue durée. Ainsi, on dénombre au total 36 épisodes (0,44/an) durant lesquels le niveau reste égal ou supérieur à 4,50 m; leur durée moyenne est de 32,5 jours. En réalité, 17 épisodes (47%)

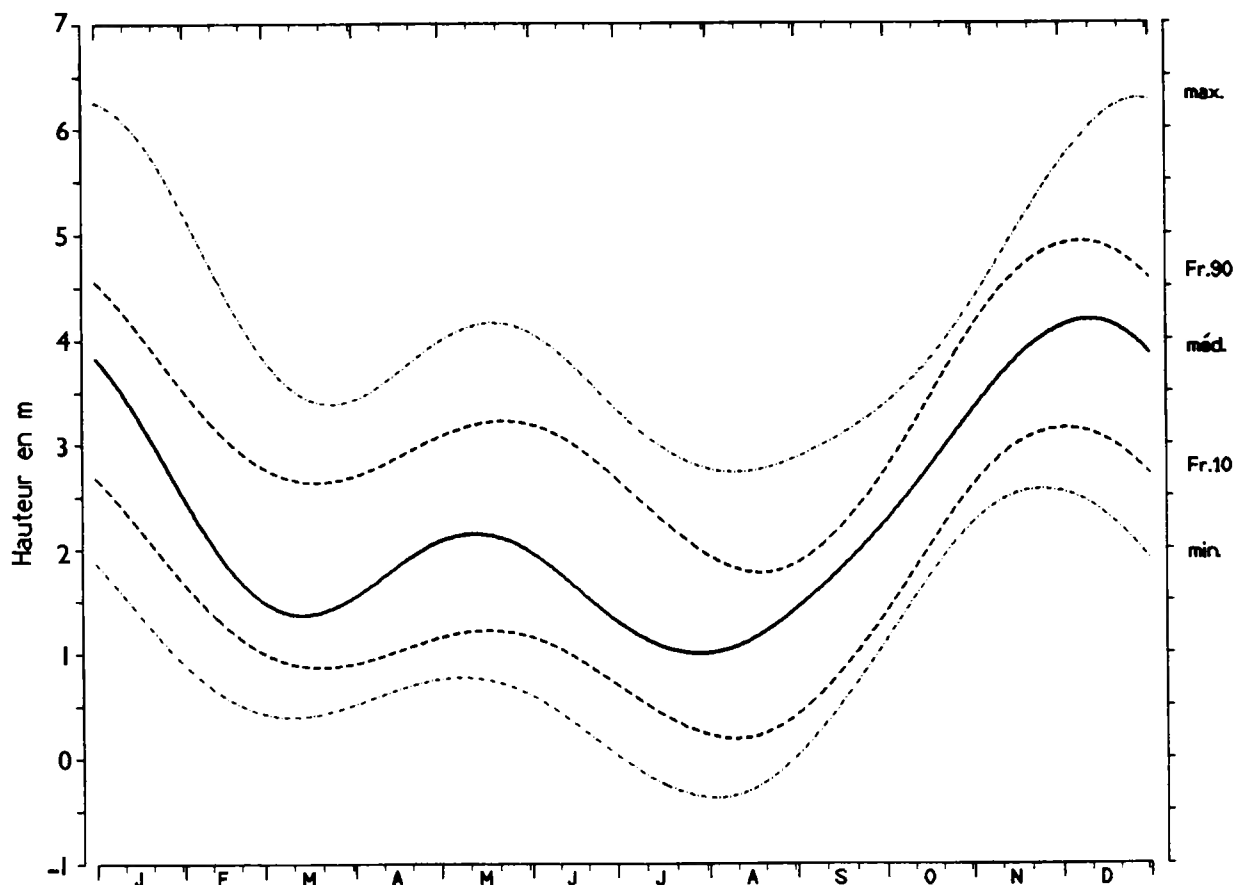


FIG. 3. — Régime annuel de la cote hydrométrique: médiane, enveloppes probabilistes et extrêmes. Période 1903-1983.

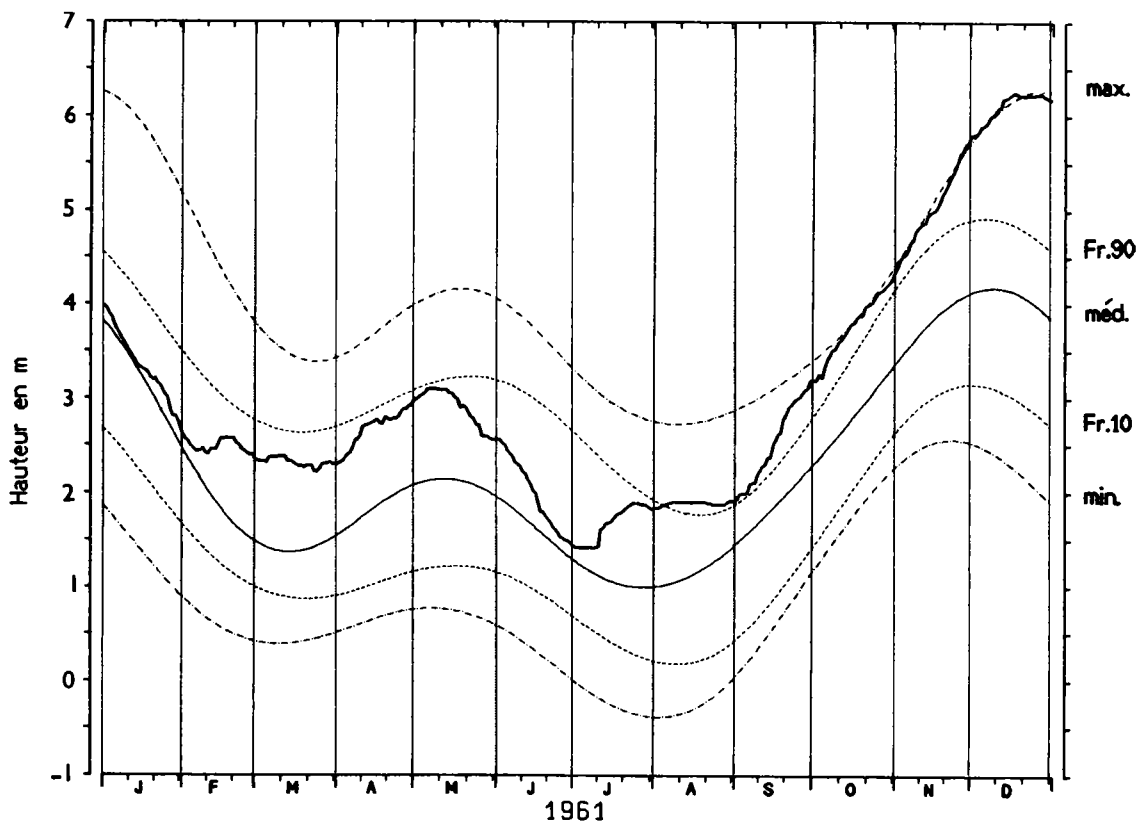
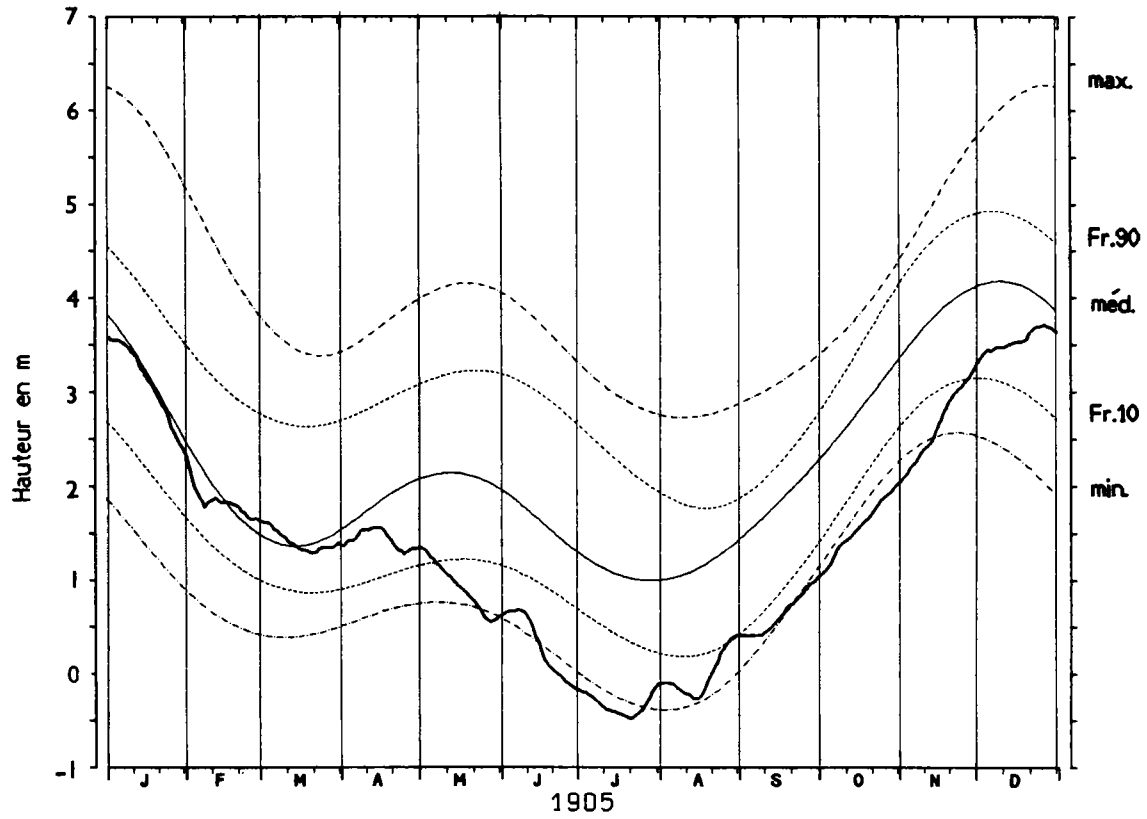


FIG. 4 (pp. 17 et 18). — Hydrogrammes de quelques années singulières (1905, 1961, 1962, 1983) comparés au régime annuel.

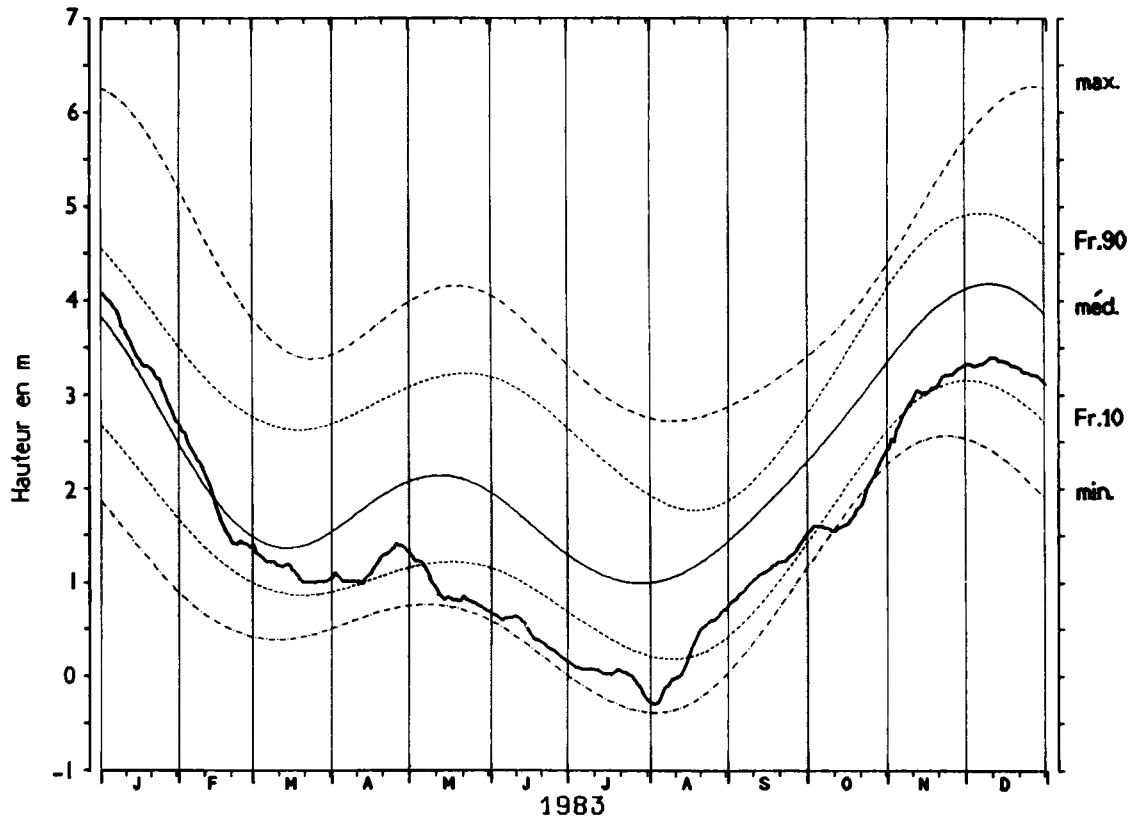
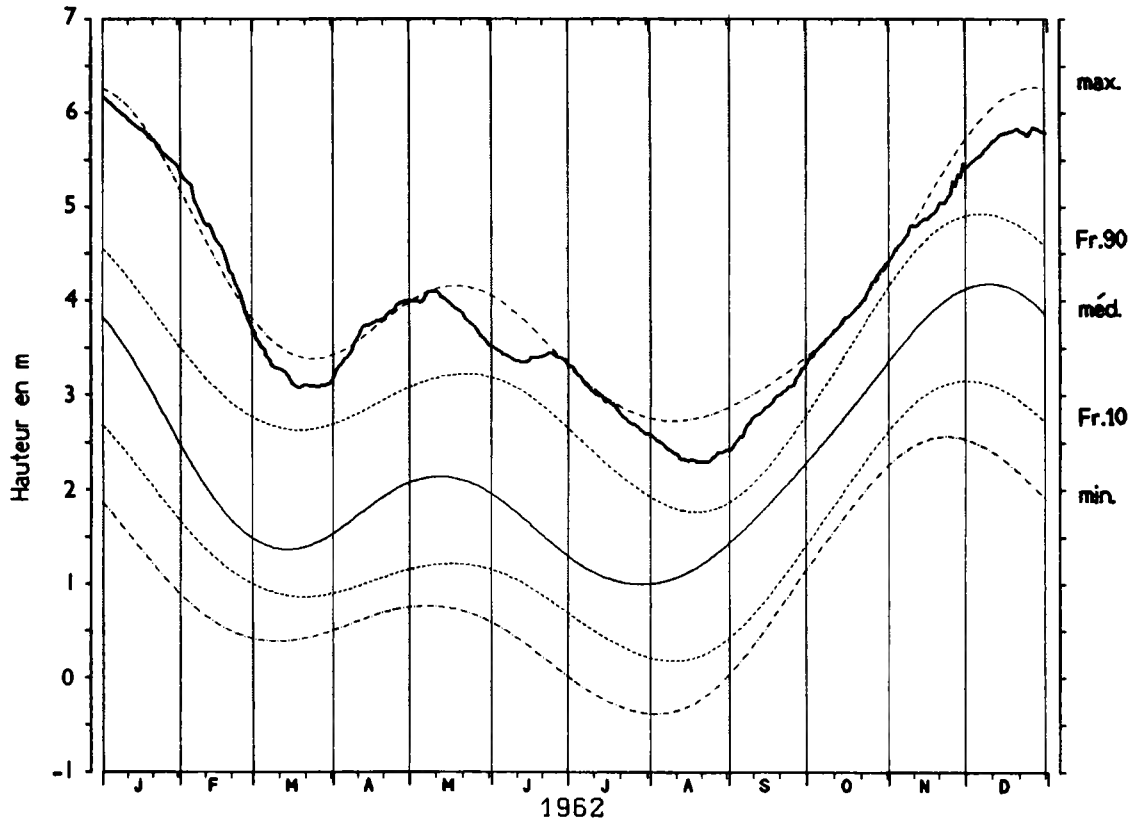


TABLEAU 2. - FREQUENCES MENSUELLES ET ANNUELLES DES HAUTES EAUX (seuils en mètres).

Période 1903-1983

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNEE
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 4.5</i>													
Moyenne	1,9	,3	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	3,1	9,2	14,4
Maximum	31,0	17,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	28,0	31,0	107,0
Année	1963	1962									1962	1969	1962
Fractile 95	12,9	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	18,9	31,0	50,0
Fractile 90	8,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	15,4	31,0	44,8
Fractile 80	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	5,0	25,0	36,0
Médiane	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 5.0</i>													
Moyenne	,7	,1	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,6	2,2	3,6
Maximum	31,0	7,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	14,0	31,0	79,0
Année	1962	1962									1961	1962	1962
Fractile 95	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	7,5	23,5	23,7
Fractile 90	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	11,6	17,8
Fractile 80	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 5.5</i>													
Moyenne	,4	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,1	,8	1,3
Maximum	27,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	5,0	31,0	54,0
Année	1962										1961	1961	1962
Fractile 95	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	6,3
Fractile 90	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0

TABLEAU 3. - EPISODES CONTINUS DE HAUTES EAUX DURANT LA PERIODE 1903 - 1983.
CLASSEMENT DES EPISODES EN FONCTION DE LEUR DUREE.

Seuil : 4,5 m				Seuil : 5 m				Seuil : 5,5 m			
Dates de début	Dates de fin	Durée (jours)	Maximum (m)	Dates de début	Dates de fin	Durée (jours)	Maximum (m)	Dates de début	Dates de fin	Durée (jours)	Maximum (m)
4/11/61	17/ 2/62	106	6,26	17/11/61	7/ 2/62	83	6,26	26/11/61	27/ 1/62	63	6,26
3/11/62	4/ 2/63	94	5,85	21/11/62	20/ 1/63	61	5,85	5/12/62	8/ 1/63	35	5,85
15/11/67	13/ 1/68	60	5,23	23/11/64	25/12/64	33	5,53	8/12/64	14/12/64	7	5,53
15/11/64	8/ 1/65	55	5,53	4/12/69	27/12/69	24	5,18				
26/11/25	18/ 1/26	54	5,07	20/11/70	10/12/70	21	5,20				
18/11/69	8/ 1/70	52	5,18	28/11/67	16/12/67	19	5,23				
27/11/34	12/ 1/35	47	4,99	9/12/08	27/12/08	19	5,17				
13/11/48	27/12/48	45	4,94	3/12/75	14/12/75	12	5,20				
25/11/08	8/ 1/09	45	5,17	17/12/25	25/12/25	9	5,07				
10/11/70	23/12/70	44	5,20	28/12/25	4/ 1/26	8	5,06				
26/11/51	6/ 1/52	42	4,90								
15/11/75	25/12/75	41	5,20								
12/11/55	21/12/55	40	4,80								
21/11/24	29/12/24	39	4,98								
26/11/66	2/ 1/67	38	4,94								
Nombre d'épisodes : 36				Nombre d'épisodes : 10				Nombre d'épisodes : 3			
Fréquence moyenne annuelle : 0,44				Fréquence moyenne annuelle : 0,12				Fréquence moyenne annuelle : 0,04			
Durée moyenne : 32,5 jours				Durée moyenne : 28,9 jours				Durée moyenne : 35 jours			

TABLEAU 4. - FREQUENCES MENSUELLES ET ANNUELLES DES BASSES EAUX (h \leq seuil, en mètres).

Période 1903-1983

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNEE
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 1,0</i>													
Moyenne	,1	1,8	4,9	2,3	1,7	3,8	13,9	14,0	3,0	,0	,0	,0	45,4
Maximum	6,0	28,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	29,0	,0	,0	,0	221,0
Année	1914	1954	1946	1915	1915	1983	1983	1983	1905				1915
Fractile 95	,0	17,9	31,0	16,8	18,4	30,0	31,0	31,0	19,0	,0	,0	,0	137,5
Fractile 90	,0	8,2	22,0	12,0	5,8	18,6	31,0	31,0	15,4	,0	,0	,0	117,8
Fractile 80	,0	,0	9,0	,0	,0	6,0	31,0	31,0	3,6	,0	,0	,0	80,0
Médiane	,0	,0	,0	,0	,0	,0	15,0	11,0	,0	,0	,0	,0	37,0
Fractile 20	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 0,5</i>													
Moyenne	,0	,3	,4	,0	,0	,8	4,8	5,6	,3	,0	,0	,0	12,2
Maximum	,0	20,0	17,0	,0	,0	18,0	31,0	31,0	13,0	,0	,0	,0	93,0
Année		1914	1920			1919	1983	1911	1905				1905
Fractile 95	,0	,0	,0	,0	,0	5,0	31,0	27,9	,9	,0	,0	,0	65,7
Fractile 90	,0	,0	,0	,0	,0	,0	24,8	22,8	,0	,0	,0	,0	53,4
Fractile 80	,0	,0	,0	,0	,0	,0	9,2	13,0	,0	,0	,0	,0	24,2
Médiane	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 0</i>													
Moyenne	,0	,0	,0	,0	,0	,2	1,2	,8	,0	,0	,0	,0	2,2
Maximum	,0	,0	,0	,0	,0	8,0	31,0	20,0	,0	,0	,0	,0	59,0
Année						1905	1905	1905					1905
Fractile 95	,0	,0	,0	,0	,0	,0	7,9	10,4	,0	,0	,0	,0	17,5
Fractile 90	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0

TABLEAU 5. - EPISODES CONTINUS DE BASSES EAUX DURANT LA PERIODE 1903 - 1983.
CLASSEMENT DES EPISODES EN FONCTION DE LEUR DUREE.

Seuil : 1,0 m				Seuil : 0,5 m				Seuil : 0 m			
Dates de début	fin	Durée (jours)	Maximum (m)	Dates de début	fin	Durée (jours)	Maximum (m)	Dates de début	fin	Durée (jours)	Maximum (m)
11/ 2/15	19/ 9/52	221	0,00	13/ 6/05	13/ 9/05	93	-0,47	23/ 6/05	20/08/05	59	-0,47
13/ 5/05	29/ 9/05	140	-0,47	28/ 6/05	7/ 9/07	72	-0,24	12/ 7/07	16/ 8/07	36	-0,24
9/ 5/19	16/ 9/19	131	-0,27	16/ 6/83	28/ 8/83	66	-0,29	24/ 6/19	27/ 7/19	34	-0,27
10/ 5/83	9/ 9/83	123	-0,29	13/ 6/19	17/ 8/19	66	-0,27	25/ 7/83	11/ 8/83	18	-0,29
12/ 6/58	19/ 9/58	100	0,03	26/ 6/15	27/ 8/15	63	0,00	31/ 7/59	12/ 8/59	13	-0,18
18/ 6/07	19/ 9/07	94	-0,24	27/ 6/59	21/ 8 59	56	-0,18	25/ 7/73	5/ 8/73	12	-0,09
8/ 6/22	9/ 9/22	88	0,04	2/ 7/22	25/ 8/22	55	0,04	13/ 8/15	16/ 8/15	4	0,00
7/ 7/13	28/ 9/13	84	0,44	8/ 7/73	23/ 8/73	47	-0,09	23/ 7/15	26/ 7/15	4	0,00
17/ 6/59	29/ 8/59	74	-0,18	7/ 7/58	22/ 8/58	47	0,03	22/ 7/73	23/ 7/73	1	0,00
29/ 6/53	10/ 9/53	74	0,02	22/ 7/14	28/ 8/14	38	0,17				
21/ 6/16	2/ 9/16	74	0,38	10/ 7/27	13/ 8/27	35	0,19				
29/ 6/27	7/ 9/27	71	0,19	31/ 7/11	3/ 9/11	35	0,24				
10/ 6/18	19/ 8/18	71	0,42	13/ 7/44	12/ 8/44	31	0,21				
25/ 6/73	31/ 8/73	68	-0,09	7/ 8/53	1/ 9/53	26	0,02				
14/ 7/14	17/ 9/14	66	0,17	18/ 7/46	11/ 8/46	25	0,20				
Nombre d'épisodes : 101				Nombre d'épisodes : 36				Nombre d'épisodes : 9			
Fréquence moyenne annuelle : 1,25				Fréquence moyenne annuelle : 0,44				Fréquence moyenne annuelle : 0,11			
Durée moyenne : 36,4 jours				Durée moyenne : 27,6 jours				Durée moyenne : 20,1 jours			

ont une durée comprise entre 1 et 30 jours et 17 épisodes entre 31 et 60 jours; les deux plus longs épisodes ont une durée respective de 94 et 106 jours.

Pour les basses eaux, on considère successivement les seuils de 1, 0,5 et 0 m (tableaux 4 et 5).

Le niveau du fleuve se maintient assez fréquemment sous le seuil de 1 m puisque, une année sur deux, cette cote n'est pas dépassée en moyenne 15 jours en juillet et 11 jours en août. Une année sur dix cette situation se produit également de février à septembre avec des fréquences variables. On dénombre au total 101 épisodes (soit 1,25/an) où la cote hydrométrique reste constamment inférieure ou égale à 1 m. La durée de ces épisodes peut être longue (moyenne: 36,4 jours); 52 épisodes ont une durée comprise entre 1 et 30 jours, 28 épisodes entre 31 et 60 jours et 5 épisodes ont une durée supérieure ou égale à 100 jours.

Pour des seuils plus bas, les fréquences diminuent. Ainsi, en moyenne, le niveau ne devient inférieur au zéro de l'échelle qu'environ une fois tous les 10 ans; cette situation ne se produit que de fin juin à mi-août. La liste de ces épisodes exceptionnels est fournie au tableau 5.

3. Courbe de tarage (figure 5)

La courbe de tarage (figure 5) a été établie à partir de 85 mesures de débit effectuées à Kinshasa-Kalina au cours des années 1955 à 1961. La section de jaugeage, qui est très stable, et les modes opératoires pour la mesure du débit ont été décrits dans une note publiée par VAN GANSE (1959).

Les fonctions testées pour l'ajustement de la relation hauteur-débit sont: une et deux fonctions quadratiques ainsi que une et deux fonctions potentielles. Lorsque la courbe de tarage est constituée de deux branches correspondant à deux fonctions distinctes, il importe que l'ajustement minimise l'écart quadratique moyen entre valeurs observées et estimées sur l'ensemble de la relation hauteur-débit et que la courbe représentative ait une pente continue. DEMARÉE (1987) a proposé récemment une méthode de calcul adaptée à ce type de problème. Considérons par exemple les deux fonctions quadratiques

$$\begin{cases} \hat{Q}_1 = a_1 H^2 + a_2 H + a_3 \\ \hat{Q}_2 = a_4 H^2 + a_5 H + a_6 \end{cases} \text{ pour } \begin{cases} H \leq a \\ a \leq H \end{cases} \quad (1)$$

expression dans laquelle a est la valeur de H au point de jonction où $\hat{Q}_1(a) = \hat{Q}_2(a)$ et où $\hat{Q}'_1(a) = \hat{Q}'_2(a)$ (tangente commune aux deux branches de parabole). On peut démontrer aisément que ces deux contraintes entraînent, entre les paramètres, les relations suivantes

$$\begin{aligned} a_5 &= 2(a_1 - a_4)a + a_2 \\ a_6 &= a_3 - (a_1 - a_4)a^2 \end{aligned} \quad (2)$$

et que le système (1) peut se réduire à la fonction unique de paramètres a_1, a_2, a_3, a_4 et a :

$$\begin{aligned} \hat{Q} &= (a_1 H^2 + a_2 H + a_3) U(a - H) \\ &+ \{ a_4 H^2 + [2(a_1 - a_4)a + a_2] H + a_3 - (a_1 - a_4)a^2 \} U(H - a) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{avec } U(x) = \begin{cases} 0 & \text{pour } x < 0 \\ \frac{1}{2} & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$$

Les estimations optimales \hat{a} des p paramètres de la relation (3) sont celles qui minimisent l'expression

$$J_2 \triangleq \sum_{i=1}^n [Q_i - \hat{Q}(H_i, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4, \hat{a})]^2 \quad (4)$$

où Q_i sont les débits mesurés lors des n jaugeages. A cet effet, on dérive J_2 par rapport aux cinq paramètres, on annule les dérivées et on résoud le système non linéaire ainsi obtenu par une technique numérique.

G. DEMARÉE a démontré aussi que la relation (3) est tout à fait appropriée pour calculer correctement l'erreur d'estimation. On sait, en effet, que la variance estimée s_Q^2 est donnée par l'expression (WOLBERG 1967):

$$s_Q^2 = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^p \frac{\partial \hat{Q}}{\partial a_j} \frac{\partial \hat{Q}}{\partial a_k} r_{jk} s_{a_j} s_{a_k} \quad (5)$$

ou encore, compte tenu de la formule d'estimation de la covariance s_{jk} , à savoir

$$s_{jk} = r_{jk} s_{a_j} s_{a_k} = \frac{J_2}{n-p} C_{jk}^{-1},$$

par l'expression:

$$s_Q^2 = \frac{J_2}{n-p} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^p \frac{\partial \hat{Q}}{\partial a_j} \frac{\partial \hat{Q}}{\partial a_k} C_{jk}^{-1} \quad (6)$$

où C_{jk}^{-1} sont les éléments de la matrice inverse de $C = X^T X$ construite à partir de la matrice

$$X = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{Q}_1}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial \hat{Q}_1}{\partial a_p} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \hat{Q}_n}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial \hat{Q}_n}{\partial a_p} \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \frac{\partial \hat{Q}_i}{\partial a_j} \equiv \left(\frac{\partial \hat{Q}}{\partial a_j} \right)_{H=H_i}$$

dans laquelle $\hat{Q}_1, \dots, \hat{Q}_n$ sont les valeurs estimées de Q pour les valeurs $H_1 \dots H_n$ des n jaugeages.

Des divers essais effectués selon la procédure ci-dessus lorsqu'elle s'imposait, il résulte que le meilleur ajustement est fourni par le couple de fonctions quadratiques

$$\begin{cases} \hat{Q} = 0,377 H^2 + 5,898 H + 24,181 & \text{pour } H \leq 3,35 \text{ m} \\ \hat{Q} = 1,224 H^2 + 0,224 H + 33,683 & \text{pour } H > 3,35 \text{ m} \end{cases} \quad (7)$$

En effet, les ajustements obtenus avec une seule fonction quadratique, une et deux fonctions potentielles conduisent à des valeurs de l'écart quadratique moyen sensiblement plus élevées

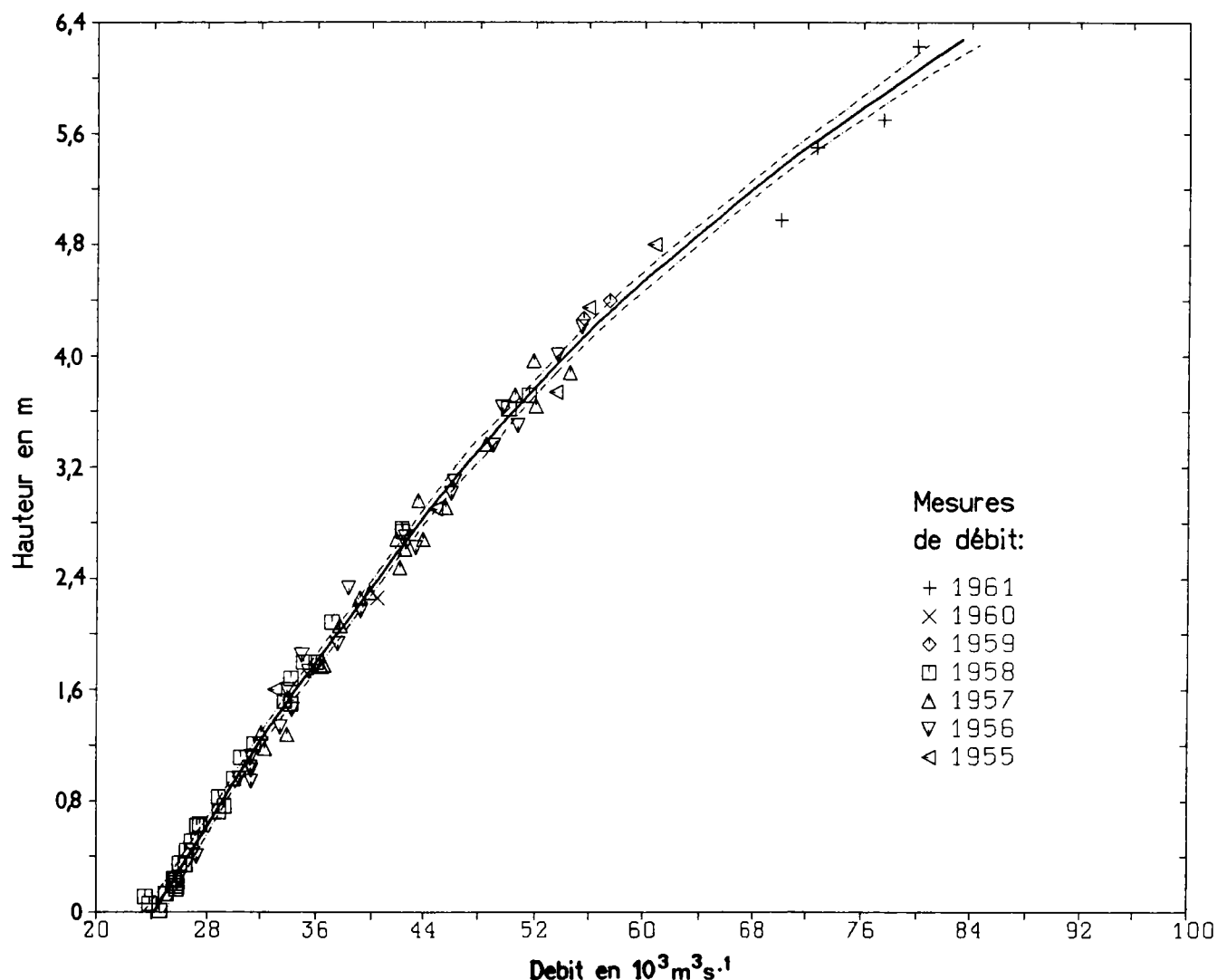


FIG. 5. — Relation hauteur-débit avec indication des points de jaugeage et de l'intervalle de confiance des estimations au niveau de probabilité 0,95.

(de 8 à 14%). La courbe de tarage illustrant les relations (7), ainsi que les données de jaugeage sur lesquelles elles s'appuient, sont représentées à la figure 5.

Les limites de l'intervalle de confiance de \hat{Q} au niveau de probabilité $1 - \alpha$ sont égales à $\pm t_{\alpha/2} s_Q$ où $t_{\alpha/2}$ est la valeur de la statistique t de Student dépassée avec une probabilité de $\alpha/2$.

Les courbes délimitant l'intervalle de confiance au niveau de probabilité 0,95 sont représentées à la figure 5. On retiendra que l'erreur maximale possible d'estimation du débit, à ce niveau de probabilité, est de l'ordre de 2 à 3% du débit pour $H \leq 0,3$ m et pour $H > 6,1$ m, de moins de 2% aux niveaux intermédiaires. L'étroitesse des limites de l'erreur d'estimation résulte à la fois de la stabilité de la section de mesure et de la bonne reproductibilité des mesures de débit.

On remarquera aussi que le plus grand débit mesuré (le 23 décembre 1961) correspond à une cote hydrométrique de 6,23 m très proche du maximum absolu (6,26 m). La courbe de tarage ne doit donc pas être extrapolée vers le haut. Par contre, le bas de la courbe, déterminé jusqu'au voisinage du zéro de l'échelle, doit être prolongé jusqu'à $-0,47$ m.

4. Débit

Les valeurs journalières du débit pour la période 1903-1983 ont été calculées à partir des cotes hydrométriques journalières en utilisant les relations (7) présentées au paragraphe 3.

RÉGIME ANNUEL (tableau 6, figure 6)

Le débit moyen mensuel présente un maximum principal ($56,1 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en décembre et un maximum secondaire ($39,1 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en mai, un minimum principal ($31,1 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en août et un minimum secondaire ($34,7 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en mars.

TABLEAU 6. - MOYENNES, MAXIMA ET MINIMA MENSUELS ET ANNUELS DES DEBITS (en $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Période 1903-1983

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNEE
<i>Moyennes mensuelles et annuelles:</i>													
Moyenne	47,49	37,65	34,71	37,17	39,15	36,72	31,70	31,09	36,37	43,17	51,71	56,08	40,25
Ecart-type	6,89	5,53	4,53	5,14	5,76	5,67	4,68	3,69	3,66	4,22	5,40	7,15	4,15
Coef. var.	,15	,15	,13	,14	,15	,15	,15	,12	,10	,10	,10	,13	,10
Maximum	76,30	61,20	47,56	52,69	53,23	51,80	44,83	43,17	45,98	52,93	65,90	80,83	54,96
Année	1962	1962	1963	1969	1962	1963	1963	1969	1969	1962	1961	1961	1962
Minimum	33,33	26,91	27,23	29,23	29,47	26,08	22,35	23,99	28,12	34,45	41,01	40,93	32,87
Année	1914	1914	1920	1915	1915	1905	1905	1907	1905	1905	1915	1913	1919
Fractile 95	57,74	47,36	44,23	46,87	50,55	48,12	41,51	36,95	42,00	50,82	61,27	66,36	47,80
Fractile 90	56,06	45,04	41,87	44,51	46,82	45,82	38,25	36,03	40,73	48,18	59,41	63,66	45,96
Fractile 80	51,88	40,79	38,17	41,91	44,50	41,45	34,93	33,47	39,00	46,64	55,63	62,37	42,90
Médiane	47,11	37,05	33,86	35,87	37,55	35,59	30,93	31,32	36,90	43,84	51,73	56,25	40,00
Fractile 20	42,15	34,04	31,15	33,00	34,30	32,24	28,26	27,74	33,07	39,78	47,07	49,71	37,12
Fractile 10	39,36	31,97	29,83	30,92	32,37	30,07	26,25	26,02	30,97	36,97	44,64	47,11	34,77
Fractile 5	38,29	30,18	28,79	29,98	30,34	28,54	24,45	25,64	29,89	35,62	42,11	43,92	33,92
<i>Maxima mensuels et annuels:</i>													
Moyenne	53,32	41,20	36,30	39,66	40,67	38,63	34,44	33,45	39,54	47,07	55,87	58,05	59,71
Ecart-type	7,42	6,45	4,75	5,76	5,73	5,50	5,59	3,60	3,96	4,66	6,51	7,37	6,85
Coef. var.	,14	,16	,13	,15	,14	,14	,16	,11	,10	,10	,12	,13	,11
Maximum	81,66	69,91	51,17	55,80	56,00	52,98	50,26	45,60	47,75	58,47	75,15	83,05	83,05
Année	1962	1962	1962	1969	1969	1963	1963	1969	1969	1962	1961	1961	1961
Fractile 95	64,11	51,60	45,08	50,26	51,69	49,88	47,05	38,22	46,84	56,14	67,85	68,29	71,95
Fractile 90	61,96	49,42	44,05	47,42	47,73	46,70	42,49	37,48	44,65	53,08	63,37	67,30	67,66
Fractile 80	58,87	45,32	39,76	45,09	46,50	43,11	38,69	36,24	42,62	50,90	60,91	64,49	64,66
Médiane	52,78	39,97	35,08	37,86	39,06	37,56	33,32	33,81	40,20	47,08	55,80	58,70	59,48
Fractile 20	47,67	36,57	32,51	34,56	35,83	34,37	30,08	29,93	35,82	43,36	50,64	51,49	54,81
Fractile 10	44,23	33,99	31,54	33,20	33,99	32,13	28,08	28,65	33,90	40,19	47,52	48,12	51,49
Fractile 5	41,66	32,65	30,16	31,74	32,65	30,33	26,38	27,69	33,18	38,85	44,05	45,26	47,64
<i>Minima mensuels et annuels:</i>													
Moyenne	41,50	35,02	33,47	34,84	37,45	34,11	29,56	29,37	33,31	39,71	47,35	52,68	28,73
Ecart-type	6,59	4,88	4,56	4,77	5,69	5,84	4,11	3,87	3,58	3,97	4,70	6,74	3,80
Coef. var.	,16	,14	,14	,14	,15	,17	,14	,13	,11	,10	,10	,13	,13
Minimum	28,88	25,98	26,35	27,54	27,60	23,19	21,49	22,50	25,62	30,86	37,78	37,48	21,49
Année	1914	1914	1920	1943	1905	1919	1905	1983	1907	1905	1907	1913	1905
Fractile 95	52,21	45,13	43,56	44,19	49,53	46,27	38,05	36,31	38,28	46,85	56,20	62,34	36,16
Fractile 90	50,39	41,80	40,49	42,67	45,68	42,79	34,97	33,93	37,48	44,83	53,43	61,00	33,27
Fractile 80	45,86	38,17	37,47	38,20	42,89	39,12	32,65	31,87	35,99	43,00	51,34	57,54	31,15
Médiane	40,28	34,44	32,49	34,16	35,66	33,18	29,14	29,27	33,67	40,28	47,33	52,98	28,37
Fractile 20	37,03	31,67	29,89	30,96	33,23	29,34	26,65	25,87	30,03	36,02	43,49	47,63	25,55
Fractile 10	34,10	29,49	28,11	29,30	30,02	27,50	24,95	24,37	27,92	34,10	40,49	43,84	24,31
Fractile 5	32,91	28,27	27,57	28,50	29,35	26,49	22,87	23,18	27,26	33,34	39,14	42,31	22,82

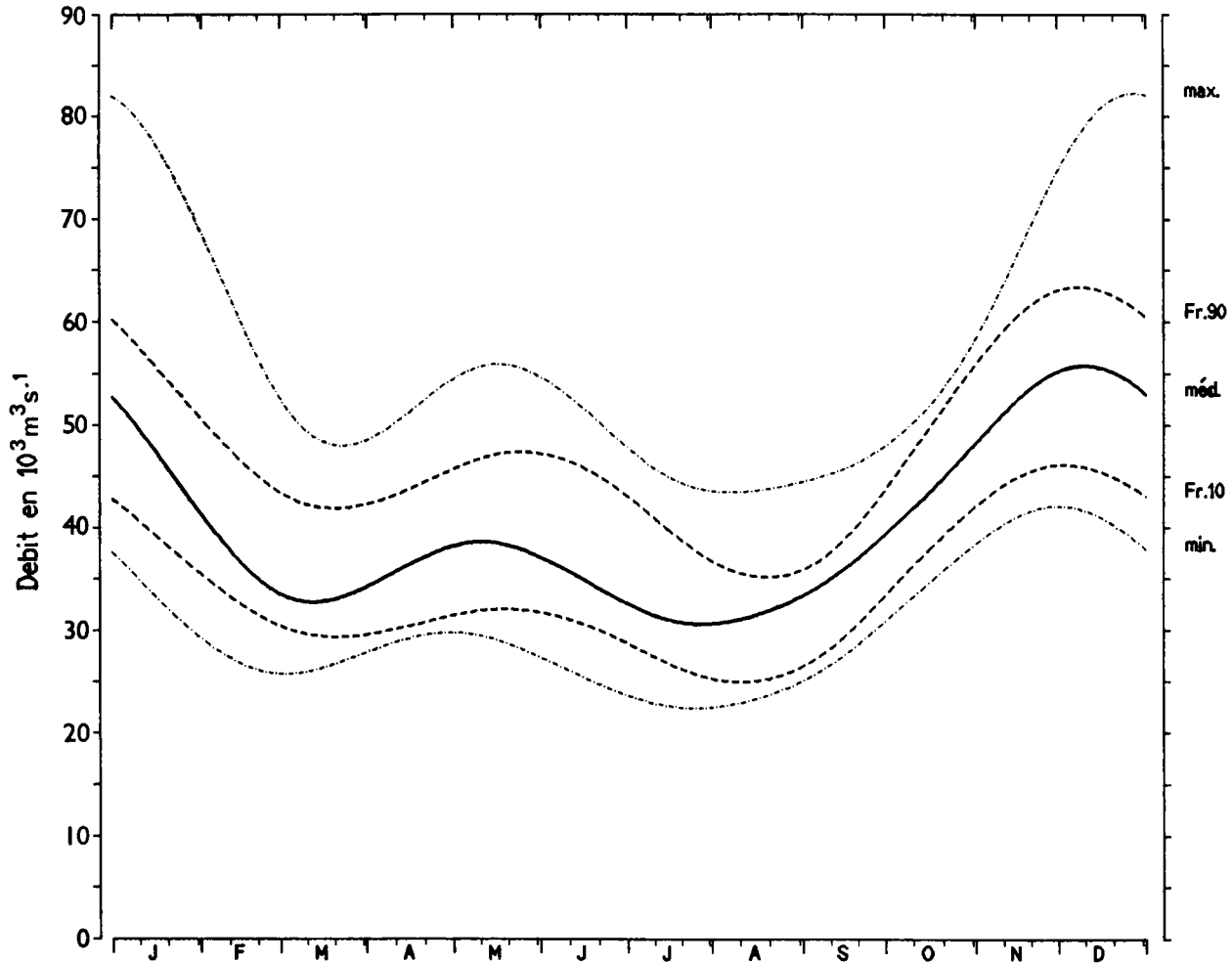


FIG. 6. — Régime annuel du débit: médiane, enveloppes probabilistes et extrêmes. Période 1903-1983.

La variabilité interannuelle est de l'ordre de 10 à 15%. Plus explicitement, l'intervalle entre les fractiles 5 et 95 de la distribution des débits mensuels est large, quelle que soit l'époque de l'année; en juillet par exemple, dans 5% des cas le débit peut descendre sous le seuil de $24,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ou dépasser $41,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; en janvier, dans 5% des cas aussi, il peut rester en deçà de $38,3 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ou franchir le seuil de $57,7 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Le débit moyen mensuel le plus élevé ($80,8 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) a été observé en décembre 1961, le plus faible ($22,3 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en juillet 1905.

Quant au débit journalier le plus élevé ($83,0 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), il est survenu le 17 décembre 1961, le plus faible ($21,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) le 20 juillet 1905.

Les courbes du régime moyen annuel et de ses enveloppes probabilistes, représentées à la figure 6, ont été établies en suivant la méthode déjà décrite pour l'établissement du régime annuel de la cote hydrométrique (figures 2 et 3).

DÉBITS CARACTÉRISTIQUES (tableau 7)

Le tableau 7 présente, pour la période 1903-1983, les valeurs moyennes et extrêmes ainsi que les fractiles 10, 25, 50,75 et 90 des principaux débits caractéristiques; on trouve successivement dans les différentes colonnes:

TABLEAU 7. - DEBITS CARACTERISTIQUES (en $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). - MOYENNES, EXTREMES ET FRACTILES SUR LA PERIODE 1903-1983.

	Minimum	DC E	DC11	DC 9	DC 6	DC 3	DC 1	DC C	Maximum
Moyenne	28,7	29,2	30,6	34,2	38,1	45,0	55,0	58,2	59,7
Minimum Date	21,5 20/7/05	21,9 1905	23,0 1905	27,1 1905	29,6 1915	36,0 1907	43,4 1913	44,9 1918	45,2 27/12/19
Maximum Date	41,1 4/8/69	41,4 1969	43,7 1969	46,2 1962	51,4 1962	63,1 1962	76,2 1961	82,6 1961	83,0 17/12/61
Fractile 10	24,3	24,8	25,9	29,5	33,0	39,6	48,0	50,4	51,8
Fractile 25	26,4	26,7	28,3	31,3	35,2	42,1	51,0	53,6	55,1
Médiane	28,6	28,8	30,0	33,6	37,0	44,9	55,1	58,3	59,5
Fractile 75	30,6	31,1	32,4	35,9	40,9	47,1	59,8	62,9	64,0
Fractile 90	33,3	33,5	35,5	39,3	44,7	50,9	62,1	66,8	67,7

- le débit d'étiage extrême (MIN): plus petit débit journalier;
- le débit caractéristique d'étiage (DCE): débit égalé ou non dépassé pendant 10 jours;
- le DC11: débit égalé ou dépassé pendant 11 mois;
- le DC9 : débit égalé ou dépassé pendant 9 mois;
- le DC6 : débit égalé ou dépassé pendant 6 mois;
- le DC3 : débit égalé ou dépassé pendant 3 mois;
- le DC1 : débit égalé ou dépassé pendant 1 mois;
- le débit caractéristique de crue (DCC): débit égalé ou dépassé pendant 10 jours;
- le débit de crue extrême (MAX): plus grand débit journalier.

On constate que les valeurs extrêmes des bas débits sont comprises dans un intervalle relativement réduit; pour les débits de crue, elles sont nettement plus contrastées. Quant aux valeurs moyennes et médianes des débits caractéristiques, elles sont très voisines. Notons encore que le débit caractéristique de crue dépassé une fois sur deux en moyenne est de $58,3 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La valeur médiane du DC11, caractéristique du seuil d'étiage, est égale à $30,0 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

FRÉQUENCES DES HAUTS ET BAS DÉBITS (tableaux 8 à 11)

Le débit de $60 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ est dépassé, une année sur dix en moyenne, pendant 14,6 jours en novembre, 31 jours en décembre et 6,8 jours en janvier. En décembre, il est même dépassé une année sur cinq en moyenne durant plus de 24 jours.

Au tableau 8, on trouvera également les fréquences mensuelles et annuelles des jours où le débit dépasse les seuils de 70 et $80 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ce dernier événement peut être considéré comme exceptionnel puisqu'il ne s'est produit qu'à un seul moment de la période d'observation (du 11 décembre 1961 au 5 janvier 1962). Les périodes de crue continue font l'objet du tableau 9. On y présente les caractéristiques des épisodes au cours desquels le débit du fleuve reste constamment égal ou supérieur aux seuils de référence, notamment les dates de début et de fin des épisodes, leur durée ainsi que le débit maximum atteint durant la crue. Les épisodes sont rangés par ordre décroissant des durées; lorsqu'ils sont nombreux, seuls les quinze plus longs sont repris dans le tableau.

TABLEAU 8. - FREQUENCES MENSUELLES ET ANNUELLES DES HAUTS DÉBITS ($Q \geq$ seuil, en $10^3 m^3 s^{-1}$)

Période 1903-1983

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNEE
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 60,0</i>													
Moyenne	1,7	,2	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	2,8	8,7	13,4
Maximum	31,0	17,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	28,0	31,0	107,0
Année	1963	1962									1962	1969	1962
Fractile 95	10,8	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	17,0	31,0	48,8
Fractile 90	6,8	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	14,6	31,0	43,8
Fractile 80	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	4,0	24,6	34,0
Médiane	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 70,0</i>													
Moyenne	,5	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,1	1,0	1,7
Maximum	31,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	8,0	31,0	63,0
Année	1962										1961	1962	1962
Fractile 95	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	9,9
Fractile 90	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
Fractile 80	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 80,0</i>													
Moyenne	,1	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,3	,3
Maximum	5,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	21,0	21,0
Année	1962											1961	1961
Fractile 95	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0

TABLEAU 9. - EPISODES DE CRUES (débit \geq seuil de référence) - DURANT LA PERIODE 1903-1983. CLASSEMENT DES EPISODES EN FONCTION DE LEUR DUREE.

Seuil : 60 (*)				Seuil : 70 (*)				Seuil : 80 (*)			
Dates de début	Dates de fin	Durée (jours)	Maximum (*)	Dates de début	Dates de fin	Durée (jours)	Maximum (*)	Dates de début	Dates de fin	Durée (jours)	Maximum (*)
6/11/61	17/ 2/62	104	83,1	23/11/61	31/ 1/62	70	83,1	11/12/61	5/ 1/61	26	83,1
3/11/62	3/ 2/62	93	76,9	30/11/62	11/ 1/63	43	76,9				
16/11/67	7/ 1/68	53	68,3								
16/11/64	7/ 1/65	53	72,3								
77/11/25	18/ 1/26	53	66,3								
18/11/69	7/ 1/70	51	67,7								
28/11/34	11/ 1/35	45	65,3								
14/11/48	27/12/48	44	64,7								
10/11/70	22/12/70	43	67,9								
25/11/08	6/ 1/09	43	67,6								
16/11/75	25/12/75	40	67,9								
27/11/51	5/ 1/52	40	64,2								
14/11/55	20/12/55	37	63,0								
23/11/24	29/12/24	37	65,1								
5/12/65	9/ 1/66	36	64,8								
Nombre d'épisodes : 32				Nombre d'épisodes : 3				Nombre d'épisodes : 1			
Fréquence moyenne annuelle : 0,39				Fréquence moyenne annuelle : 0,037				Fréquence moyenne annuelle : 0,012			
Durée moyenne : 33,9 jours				Durée moyenne : 44,7 jours				Durée moyenne : 26 jours			

(*) en $10^3 m^3 s^{-1}$

Pour les bas débits, les seuils de référence ont été fixés à 30 et 25 $10^3 m^3 s^{-1}$. Une année sur deux en moyenne, le débit critique de 30 $10^3 m^3 s^{-1}$ n'est pas atteint durant 10 jours en juillet et 6 jours en août (tableau 10).

TABLEAU 10. - FREQUENCES MENSUELLES ET ANNUELLES DES BAS DEBITS ($Q \leq$ seuil, en $10^3 m^3 s^{-1}$).
Période 1903-1983

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNEE
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 30,0</i>													
Moyenne	,1	1,5	3,6	1,9	1,2	3,2	12,5	12,0	2,4	,0	,0	,0	38,4
Maximum	4,0	28,0	31,0	28,0	29,0	30,0	31,0	31,0	27,0	,0	,0	,0	209,0
Année	1914	1954	1920	1915	1915	1983	1983	1983	1913				1915
Fractile 95	,0	14,8	28,7	14,9	14,9	25,6	31,0	31,0	16,9	,0	,0	,0	126,2
Fractile 90	,0	3,8	17,0	9,2	,8	15,4	31,0	31,0	12,0	,0	,0	,0	99,4
Fractile 80	,0	,0	1,0	,0	,0	4,0	29,2	31,0	,6	,0	,0	,0	72,8
Médiane	,0	,0	,0	,0	,0	,0	10,0	6,0	,0	,0	,0	,0	30,0
Fractile 20	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
<i>Fréquences mensuelles et annuelles, seuil: 25,0</i>													
Moyenne	,0	,0	,0	,0	,0	,3	1,8	1,8	,0	,0	,0	,0	3,9
Maximum	,0	,0	,0	,0	,0	12,0	31,0	27,0	,0	,0	,0	,0	65,0
Année						1905	1919	1907					1905
Fractile 95	,0	,0	,0	,0	,0	,0	21,0	15,8	,0	,0	,0	,0	39,8
Fractile 90	,0	,0	,0	,0	,0	,0	2,4	12,2	,0	,0	,0	,0	13,0
Fractile 80	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0

TABLEAU 11. - EPISODES D'ETIAGE (débit \leq seuil de référence) DURANT LA PERIODE 1903-1983.
- CLASSEMENT DES EPISODES EN FONCTION DE LEUR DUREE.

Seuil : 30 (*)				Seuil : 25 (*)			
Dates de début	Dates de fin	Durée (jours)	Minimum (*)	Dates de début	Dates de fin	Durée (jours)	Minimum (*)
16/ 5/05	26/ 9/05	134	21,5	19/ 6/05	22/ 8/05	65	21,5
12/ 5/83	9/ 9/83	119	22,5	10/ 7/07	27/ 8/07	49	22,8
3/ 6/19	12/ 9/19	102	22,6	3/ 7/83	14/ 8/83	43	22,5
9/ 6/15	18/ 9/15	102	24,2	21/ 6/19	31/ 7/19	41	22,6
13/ 6/58	16/ 9/58	96	24,4	20/ 7/73	14/ 8/73	26	23,7
20/ 6/07	17/ 9/07	90	22,8	30/ 7/59	16/ 8/59	18	23,1
9/ 7/13	27/ 9/13	81	26,8	20/ 7/15	4/ 8/15	16	24,2
15/ 6/22	1/ 9/22	79	24,4	13/ 8/53	25/ 8/53	13	24,3
19/ 6/59	28/ 8/59	71	23,1	4/ 8/22	16/ 8/22	13	24,4
29/ 6/53	7/ 9/53	71	24,3	7/ 8/15	19/ 8/15	13	24,2
14/ 2/15	24/ 4/15	71	28,0	13/ 7/59	17/ 7/59	5	24,8
13/ 6/18	18/ 8/18	67	26,7	6/ 8/58	10/ 8/58	5	24,4
26/ 6/73	29/ 8/73	65	23,7	13/ 8/58	16/ 8/58	4	24,4
30/ 6/27	2/ 9/27	65	25,3	13/ 7/58	15/ 7/58	3	24,9
16/ 7/14	16/ 9/14	63	25,2				
Nombre d'épisodes : 96				Nombre d'épisodes : 14			
Fréquence moyenne annuelle : 1,19				Fréquence moyenne annuelle : 0,17			
Durée moyenne : 32,4 jours				Durée moyenne : 22,4 jours			

(*) en $10^3 m^3 s^{-1}$

TABLEAU 12. - MOYENNES, MAXIMA ET MINIMA MENSUELS ET ANNUELS DES ECOULEMENTS (en mm).

Période 1903-1988

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNEE
<i>Totaux mensuels et annuels:</i>													
Moyenne	33,9	24,5	24,8	25,7	28,0	25,4	22,7	22,2	25,2	30,9	35,8	40,1	339,1
Ecart-type	4,9	3,6	3,2	3,6	4,1	3,9	3,3	2,6	2,5	3,0	3,7	5,1	34,9
Coef. var.	,1	,1	,1	,1	,1	,2	,1	,1	,1	,1	,1	,1	,1
Maximum	54,5	39,5	34,0	36,4	38,0	35,8	32,0	30,9	31,8	37,8	45,6	57,8	462,4
Année	1962	1962	1963	1969	1962	1963	1963	1969	1969	1962	1961	1961	1962
Minimum	23,8	17,4	19,5	20,2	21,1	18,0	16,0	17,1	19,5	24,6	28,4	29,3	276,6
Année	1914	1914	1920	1915	1915	1905	1905	1907	1905	1905	1915	1913	1919
Fractile 95	41,3	31,4	31,6	32,4	36,1	33,3	29,7	26,4	29,1	36,3	42,4	47,4	403,3
Fractile 90	40,1	29,3	29,9	30,8	33,5	31,7	27,3	25,8	28,2	34,4	41,1	45,5	388,0
Fractile 80	37,1	26,5	27,3	29,0	31,8	28,7	25,0	23,9	27,0	33,3	38,5	44,6	361,3
Médiane	33,7	23,9	24,2	24,8	26,8	24,6	22,1	22,4	25,5	31,3	35,8	40,2	337,0
Fractile 20	30,1	22,0	22,3	22,8	24,5	22,3	20,2	19,8	22,9	28,4	32,6	35,5	313,0
Fractile 10	28,1	21,0	21,3	21,4	23,1	20,8	18,8	18,6	21,4	26,4	30,9	33,7	292,7
Fractile 5	27,4	20,1	20,6	20,7	21,7	19,7	17,5	18,3	20,7	25,5	29,1	31,4	285,5

C'est en 1905 notamment que le débit est resté le plus longtemps sous le seuil de $25 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (tableau 11). Au cours de cette période d'étiage, qui a duré plus de deux mois, le débit est descendu jusqu'à $21,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

5. Ecoulement (tableau 12)

L'apport d'eau météorique moyen annuel sur le bassin est de l'ordre de 1550 mm. Quant à l'évapotranspiration moyenne annuelle, elle est voisine de 1200 mm (BULTOT 1971). L'écoulement, qui serait donc de quelque 350 mm par an, ne représente par conséquent que 20 à 25 % de la lame d'eau précipitée. On ne s'étonnera donc pas que les valeurs de l'écoulement figurant au tableau 12 soient relativement faibles.

Par ailleurs, le décalage entre le régime des pluies de part et d'autre de l'équateur a pour effet de réduire l'amplitude du régime annuel de l'écoulement. C'est ainsi que l'écoulement varie à peine du simple au double entre le mois d'août où il est le plus faible (22 mm) et le mois de décembre où il est le plus élevé (40 mm).

6. Crues (tableau 13, figure 7)

La grande crue annuelle se situant en décembre-janvier, les valeurs maximales annuelles du débit doivent être recherchées sur l'année hydrologique (du 1^{er} septembre au 31 août) afin d'assurer l'indépendance des valeurs trouvées.

La distribution des valeurs maximales annuelles du débit journalier a été ajustée par la fonction doublement exponentielle (loi de Gumbel) suivante :

$$P(Q \leq Q_0) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{Q_0 - 6,3356}{54,445} \right) \right]$$

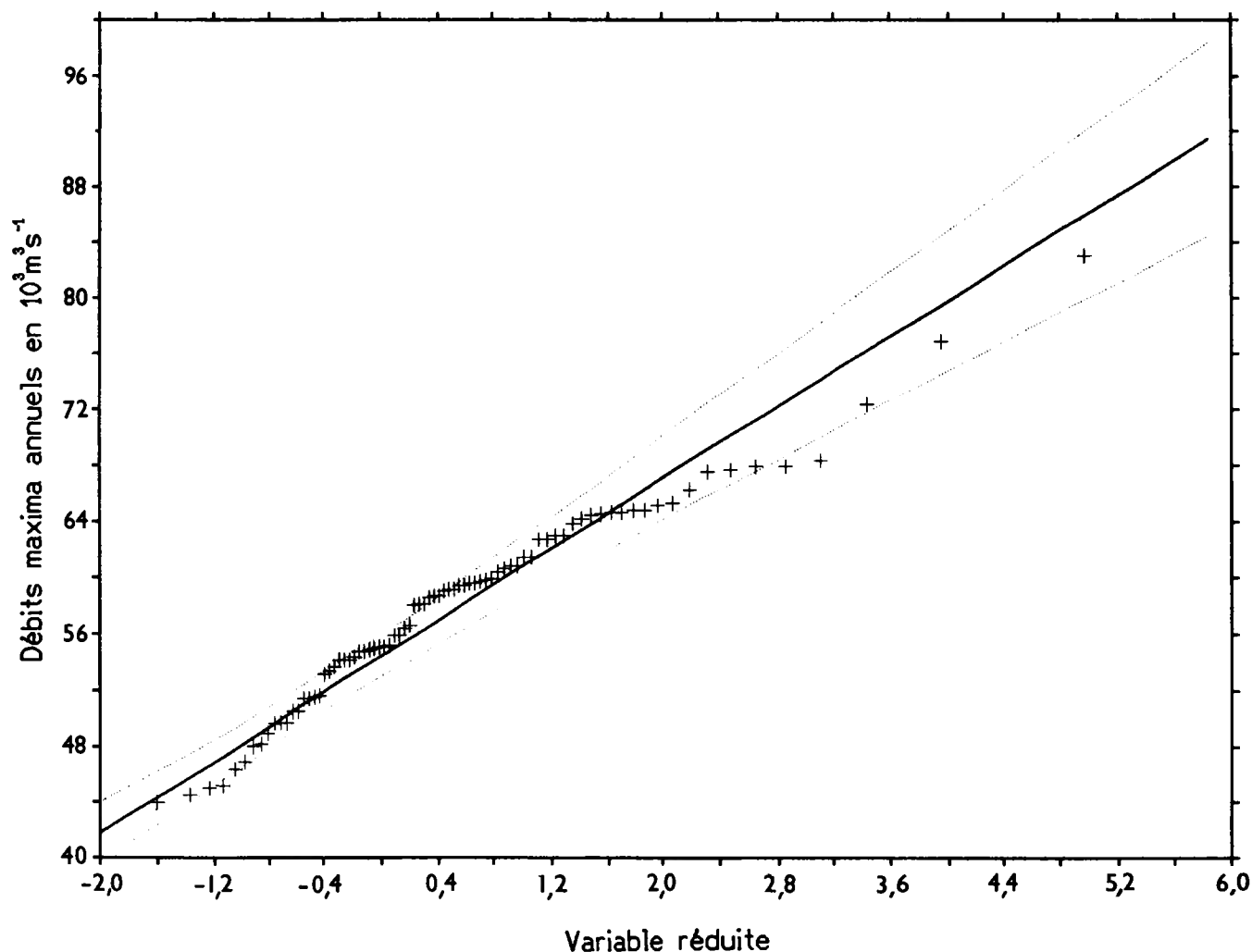


FIG. 7. — Distribution de fréquences des valeurs maximales annuelles du débit journalier. Ajustement par une fonction doublement exponentielle.

Les trois tests d'adéquation utilisés, le test χ^2 , le test de Kolmogorov-Smirnov et le test sur les valeurs extrêmes, prouvent que cet ajustement est très satisfaisant. En effet, la valeur observée de χ^2 , égale à 4,81, est nettement en deçà du seuil $\chi_{0,95} = 7,81$ (pour 3 degrés de liberté). Le plus grand écart entre probabilité observée et estimée (pour une valeur donnée) est égal à 0,116 et est inférieur à l'écart critique 0,119. Quant à la probabilité estimée de la valeur maximale (0,4121), elle correspond assez bien à la valeur la plus probable de sa loi de distribution. Le graphique de la figure 7 confirme aussi la validité de l'ajustement.

Du tableau 13, il ressort notamment que le débit journalier dépassé une fois en moyenne en 10 ans est de $69 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; en 50 ans, de $79 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; en 100 ans, de $84 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ces valeurs peuvent être affectées d'une erreur qui, dans 95% des cas, est limitée respectivement à $\pm 4,7$, $\pm 6,2$ et $\pm 6,8\%$.

A noter que la valeur maximale du débit journalier pour la période 1903-1983, à savoir: $83,0 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, est proche de la valeur correspondant à la période de retour de 100 ans.

TABLEAU 13. - DEBIT MAXIMUM ANNUEL ESTIME POUR DIVERSES PERIODES DE RETOUR.

Période de retour (années)	Maximum annuel (*)	Intervalle de confiance, seuil de probabilité:0,95 (*)
5	64	61 - 66
10	69	65 - 72
20	73	69 - 77
25	75	71 - 79
50	79	74 - 84
100	84	78 - 89
200	88	82 - 94

(*) en $10^3 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$

7. Récurrence et périodicité de la série 1903-1983 des débits moyens mensuels

PERSISTANCE

Le corrélogramme des débits moyens mensuels, illustré à la figure 8a, est un corrélogramme typique d'une série cyclique dont les composantes principales ont une période de 12 et de 6 mois. L'intervalle de confiance au niveau de probabilité 0,95 déduit de l'écart-type des coefficients d'autocorrélation est très largement dépassé, ce qui est normal puisque le régime annuel est bien marqué tout au long de la série. Le graphique de la figure 8b est davantage instructif parce qu'il montre que les résidus obtenus après enlèvement des composantes annuelle et saisonnière manifestent une grande persistance. Comme il s'agit de résidus, le test de Durbin et Watson (CHOW 1964) est mieux approprié pour apprécier la signification de l'autocorrélation de cette série. Ainsi qu'il ressort du corrélogramme 8c, une persistance est également apparente entre débits annuels successifs mais dans une mesure moindre.

STATIONNARITÉ

Dès l'abord, la série des écarts entre les débits mensuels observés et les débits moyens mensuels (après élimination des composantes annuelle et saisonnière) (cf. fig. 9a) montre que la série de référence n'est vraisemblablement pas stationnaire. Cette propriété est confirmée par divers tests.

Les valeurs mensuelles de la moyenne et de l'écart-type des débits calculées de manière progressive à partir des éléments successifs de la série 1903-1983 accusent une tendance significative qui saute aux yeux sur le graphique de la figure 9b. Cette caractéristique est confirmée par la valeur élevée et nettement supérieure au seuil de signification à 0,05 de la statistique

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} = 10,4$$

où r est le coefficient de corrélation entre les résidus des débits moyens mensuels et la variable temps et où t est distribué selon la loi de Student. Par ailleurs, on constate que la série des

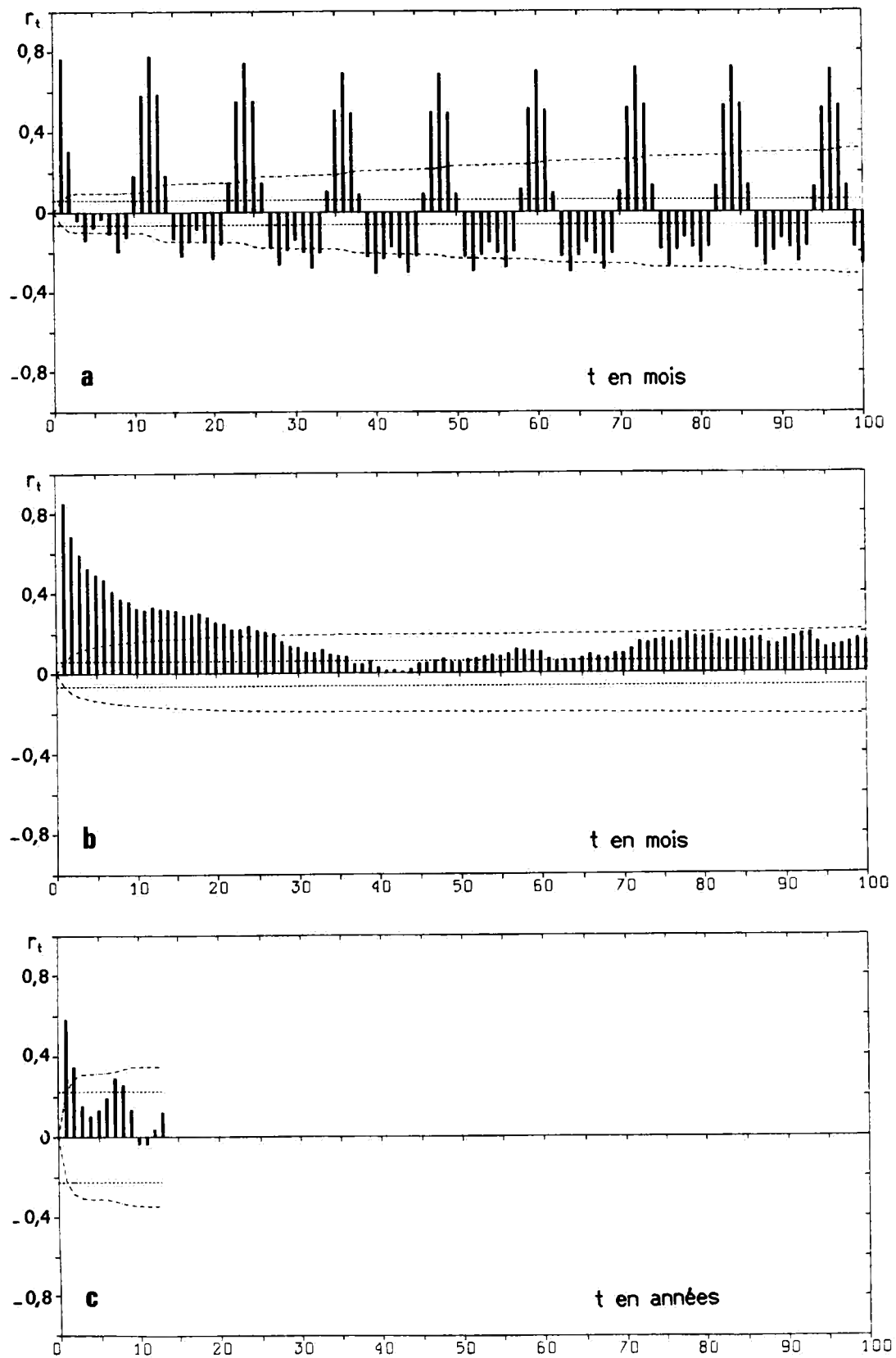


FIG. 8. — Corrélogrammes de la série des débits moyens :

a) débits moyens mensuels; b) après enlèvement des composantes annuelle et saisonnière; c) débits moyens annuels.

En traits mixtes : intervalle de confiance au niveau de probabilité 0,95 déduit de l'écart-type des coefficients d'autocorrélation; en pointillé : seuil de signification au niveau de probabilité 0,95 de Durbin et Watson.

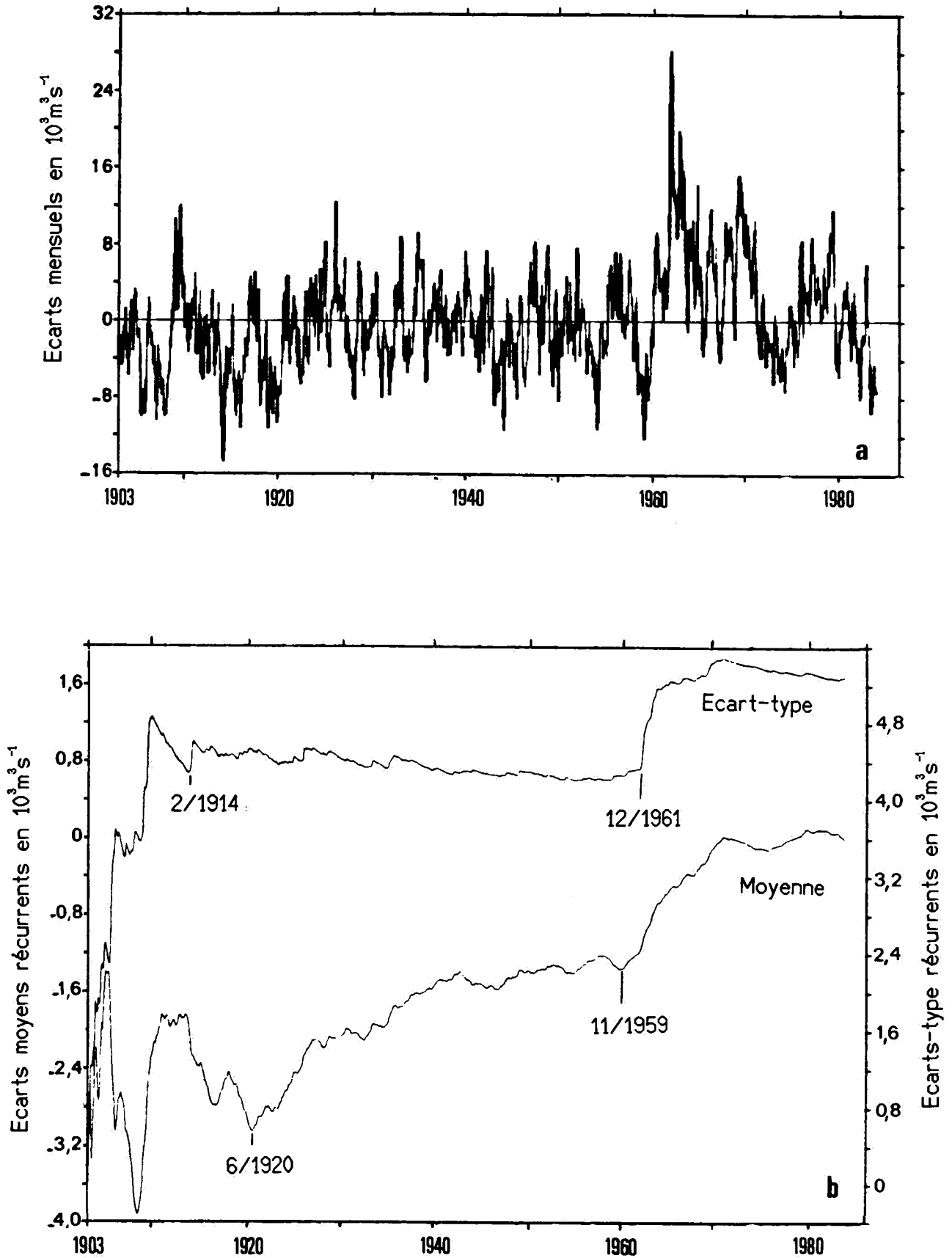


FIG. 9. — a) Série des écarts moyens mensuels (après élimination des composantes annuelle et saisonnière);
 b) Moyennes et écarts-types récurrents.

résidus mensuels x [obtenus après enlèvement des composantes annuelle et saisonnière et de la composante persistante d'ordre deux (afin de pouvoir appliquer valablement le test de Mann sur une série simple et aléatoire)] présente un changement brusque à partir d'août 1959. Celui-ci est mis en évidence à la figure 10a où l'on a représenté graphiquement les valeurs successives de la statistique de Mann

$$u_k = \frac{t_k - E(t_k)}{\sqrt{\text{var } t_k}} \quad \text{avec} \quad t_k = \sum_{i=1}^k n_i$$

où n_i est le nombre de valeurs y_j qui précèdent y_i telles que $y_i > y_j$, y_i étant le rang attribué à la valeur x_i lorsqu'on range les x par ordre de grandeur croissante. Les valeurs de u_k sont calculées sur la série directe et sur la série rétrograde (SNEYERS 1975). Sur le graphique 10a on décèle aussi une modification rapide de la série de référence en 1920.

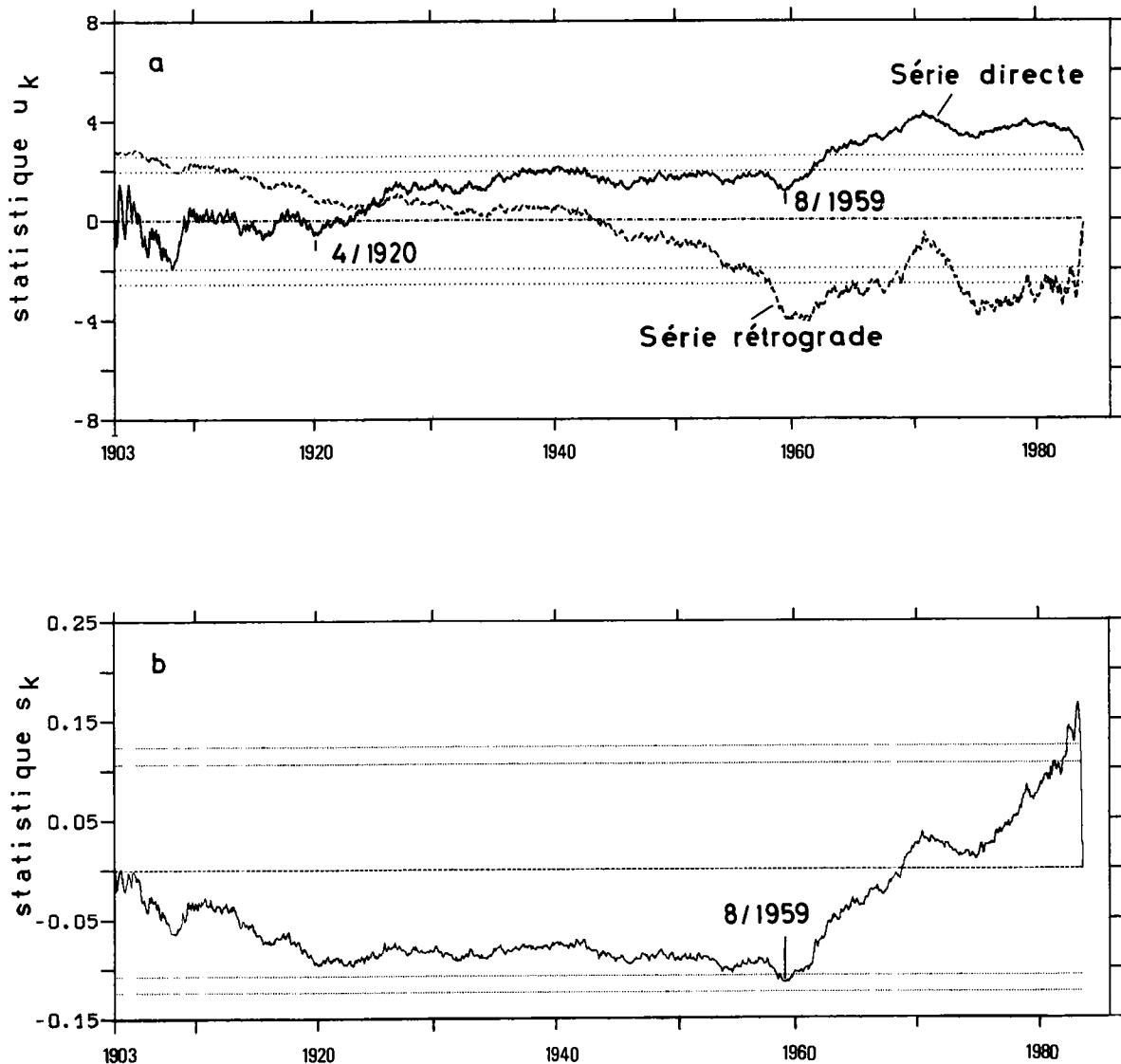


FIG. 10. — Analyse de la série des résidus moyens mensuels (après élimination des composantes annuelle et saisonnière et de la composante persistante):

- a) valeurs progressives de la statistique u_k (test de Mann) et limites de confiance à 0,95 et 0,99;
 b) valeurs progressives de la statistique s_k (sommés partielles pondérées) et limites de confiance à 0,95 et 0,99.

Ces résultats sont confirmés par un autre test spécialement conçu pour détecter les sauts brusques. Il s'agit d'un test dont la statistique s_k est définie comme suit

$$s_k = [k(n-k)]^{-1/2} \frac{\sum_{j=1}^k (x_j - \bar{x})}{s_x} \quad (k = 1, \dots, n-1)$$

La valeur extrême de s_k , si elle est significative, ce qui est le cas en l'occurrence, correspond à un changement brusque (WITTER 1984). On retrouve bien sur la figure 10b, où sont représentées les valeurs de s_k , le saut du mois d'août 1959. En appliquant le même test sur les sous-séries 3/1903 à 8/1959 et 9/1959 à 12/1983, on décèle bien un saut (quoique non significatif au niveau de probabilité 0,95) en avril 1920 et un autre saut (qui, lui, est significatif) en novembre 1970.

En définitive, il est clair que la série de référence n'est stationnaire ni au second ordre ni au premier ordre (YAGLOM 1955). Si l'on considère que le bassin versant du Zaïre est très vaste, qu'il est à cheval sur l'équateur et que les régimes pluviométriques plus ou moins décalés sur les parties septentrionales et méridionales du bassin peuvent combiner leurs effets de manière complexe, que le bassin comporte des grands lacs caractérisés par d'amples fluctuations pluri-annuelles du niveau, il est évident que des «intégrateurs» peuvent agir considérablement dans la partie stochastique de génération du débit à Kinshasa.

VARIATIONS CYCLIQUES (1)

Afin de déceler d'éventuelles périodicités dans la série chronologique de référence, on a établi le spectre de variance reproduit à la figure 11. Cette technique revient à calculer la part $V(\omega)$ de la variance observée attribuable à un signal de fréquence ω , soit en d'autres termes, le rapport

$$V(\omega) = 100 \times \frac{SSR(\omega)}{TSS}$$

où TSS désigne la somme des carrés des observations et $SSR(\omega)$ la somme des carrés du signal périodique de fréquence ω ajusté aux observations (DE MEYER 1985). En faisant varier continûment la fréquence, on obtient le spectre de variance. Une valeur élevée du spectre correspond donc à une variation périodique expliquant une part importante de la variance totale. Les maxima d'un spectre indiquent les fréquences des variations cycliques dont la variance totale observée est essentiellement tributaire.

Sur la figure 11, l'échelle des abscisses est exprimée en cycles par mois; l'échelle des ordonnées en pour cent de la variance totale observée. Par ailleurs ces dernières ont été rapportées à une échelle logarithmique de manière à repérer plus aisément les fréquences des pics de faible amplitude. Diverses bandes de fréquences ont été considérées afin de mieux mettre en évidence les variations cycliques de basses fréquences.

Les principaux pics du spectre sont identifiés et traduits en termes de périodes exprimées en mois (et en années pour les plus longues périodes). Il ne faut pas s'étonner du fait que les pics correspondant aux variations de périodes supérieures à l'année ne représentent qu'une

(1) Etude réalisée en collaboration avec D. GELLENS et F. DE MEYER.

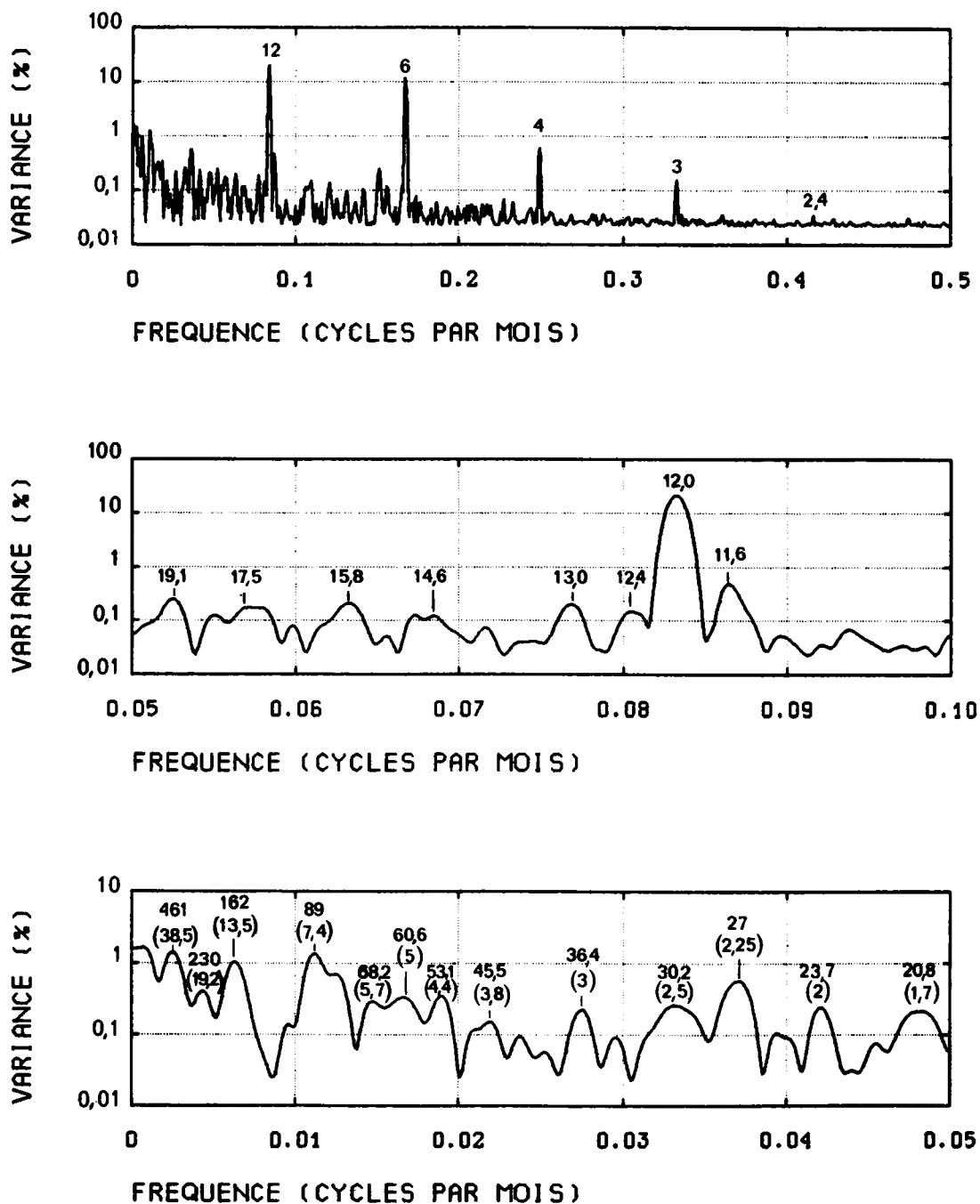


FIG. 11. — Spectre de variance de la série des débits mensuels (les fréquences correspondant aux pics identifiés sont converties en périodes exprimées en mois).

faible part de la variance totale. Cela est surtout dû au fait que la variation saisonnière domine largement les autres fluctuations présentes dans la série des valeurs mensuelles.

En définitive, on peut retenir de prime abord un ensemble de 25 variations cycliques dont les périodes sont indiquées au tableau 14.

Le spectre de variance n'offre évidemment qu'une première présomption. Il indique quelles sont les périodicités à prendre en considération dans un modèle trigonométrique. Ce n'est qu'après ajustement de ce dernier qu'il est possible de distinguer les périodicités qui ont une amplitude négligeable ou non.

TABLEAU 14. - CARACTERISTIQUES DES COMPOSANTES CYCLIQUES RECENSEES.

Période (mois)	Amplitude (*)	amplitude (% du module)	Phase Degrés)
2,4	0,20	0,2	176
3,0	0,72	1,8	120
4,0	1,40	3,5	54
6,0	6,33	15,7	92
11,6	0,61	1,5	270
12,0	8,39	20,8	29
12,4	0,72	1,8	279
13,0	0,62	1,5	229
14,6	0,66	1,6	154
15,8	0,63	1,6	185
17,5	0,49	1,2	227
19,1	0,86	2,1	30
20,8	0,36	0,9	141
23,7	0,67	1,7	342
27,0	0,93	2,3	231
30,2	0,78	1,9	138
36,4	0,76	1,9	34
45,5	0,79	2,0	82
53,1	0,95	2,4	296
60,6	0,82	2,0	160
68,2	0,91	2,3	172
89,0	2,27	5,6	351
162,0	1,92	4,8	154
230,0	1,05	2,5	286
461,0	2,35	5,8	111

(*) en $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Les composantes retenues sont écrites en caractères *italiques*.

Le modèle trigonométrique considéré est de la forme

$$y_i = M + \sum_{k=1}^m A_k \cos(\omega_k t_i + \varphi_k) + e_i$$

où $m = 25$ est le nombre de périodes P_k et $\omega_k = \frac{2\pi}{P_k}$ la pulsation de la $k^{\text{ième}}$ composante

cyclique, où M est une constante, A_k et φ_k l'amplitude et la phase de la $k^{\text{ième}}$ composante, et où e_i est l'erreur d'estimation sur le débit observé à l'instant t_i .

Par régression multiple entre les observations et les différentes composantes cycliques, les amplitudes et phases des 25 composantes cycliques présumées sont ajustées en vue de minimiser l'écart quadratique entre les observations et les valeurs estimées par le modèle. Les valeurs trouvées pour l'amplitude et la phase de chacune des composantes cycliques sont regroupées au tableau 14.

En ce qui concerne les variations cycliques de périodes pluriannuelles, celles qui nous intéressent au premier chef, on constate que les composantes de 89 et de 162 mois ont des amplitudes respectives de $2,27 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et de $1,92 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, c'est-à-dire de l'ordre de 5% du débit moyen annuel. Quant aux composantes de périodes de 230 et de 461 mois, elles correspondent vraisemblablement à des pseudo-variations cycliques engendrées par la non-stationnarité de la série de référence et ne peuvent donc pas être prises en considération. Il semble par ailleurs que l'on puisse négliger les autres composantes de périodes pluriannuelles, leurs amplitudes étant toutes inférieures à 2,5% du module.

Il est possible que les oscillations périodiques de 89 mois (soit 7 ans 5 mois) et de 162 mois (soit 13 ans 6 mois) puissent trouver une explication dans des effets conjugués des marées solaires et lunaires. La somme de ces deux seules oscillations engendre des battements dont l'amplitude peut atteindre jusqu'à environ 10% du module, c'est-à-dire de l'ordre de 23% de la variance de la série. On voit d'ailleurs sur la figure 12 que les effets conjugués de ces deux oscillations sont loin d'être négligeables comparativement aux fluctuations de la série observée. En définitive, les variations cycliques de 7 ans 5 mois et 13 ans 6 mois, qui ne sont peut-être que des quasi-périodicités, semblent nettement plus significatives qu'elles ne le paraissent dès l'abord.

CARACTÈRE REPRÉSENTATIF DE LA SÉRIE DE RÉFÉRENCE 1903-1983

Par suite du caractère non stationnaire et apparemment cyclique de la série 1903-1983, il est évident que les statistiques générales établies dans les paragraphes précédents doivent être

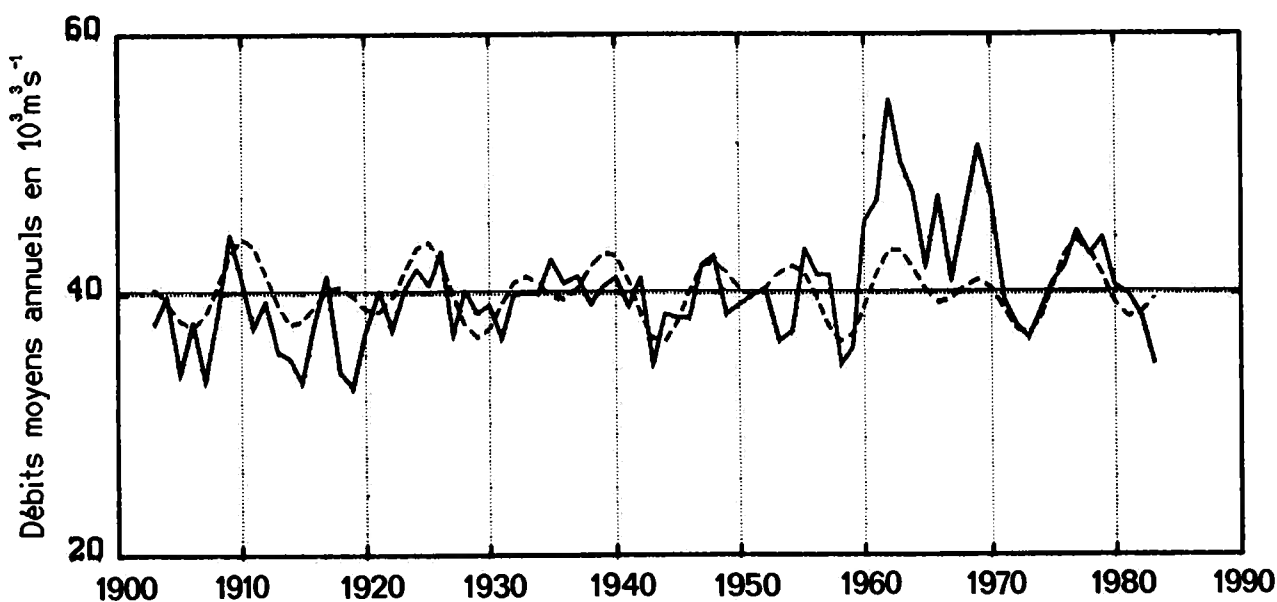


FIG. 12. — Comparaison des séries des débits moyens annuels (trait plein) et des valeurs sommées des composantes cycliques de 7 ans 5 mois et de 13 ans 6 mois (trait discontinu).

interprétées avec nuances. En exploitant la série complète, c'est-à-dire en s'appuyant sur un grand échantillon, on augmente en principe la précision des estimations. Par contre, en limitant la série aux vingt ou trente dernières années, on accroît la valeur de prédiction attribuable normalement aux paramètres. C'est dire que l'information présentée dans les paragraphes précédents concernant le régime moyen du fleuve Zaïre et la distribution des valeurs extrêmes n'est strictement représentative de l'écoulement et de son évolution que dans les limites de la période 1903-1983.

Il va de soi aussi que la persistance entre éléments successifs, de même que les caractères non stationnaire et cyclique de la série de référence, devront être pris en considération dans la conception du modèle de prévision hydrologique exposé ci-après. L'ajustement des paramètres doit en effet être effectué sur une séquence d'observations suffisamment longue pour stabiliser les estimations de ces paramètres. Mais, il faut par contre que cette séquence soit aussi courte que possible pour refléter l'évolution parfois rapide de l'écoulement.

8. Modèle de prévision du débit moyen mensuel

DESCRIPTION DU MODÈLE

Il s'agit d'un modèle autorégressif appliqué au débit moyen mensuel. Il exploite la forte persistance du débit et ne fait intervenir aucune variable exogène.

Le débit moyen mensuel prévu \hat{Q}_t , où t correspond au $m^{\text{ième}}$ mois de l'année, est la somme de trois composantes, à savoir

$$\hat{Q}_t = \hat{P}_m + \hat{R}_t + \hat{E}_t \quad (8)$$

où :

- \hat{P}_m est la composante spécifique au mois m , estimée à partir d'un sous-modèle trigonométrique représentant la variation périodique moyenne du débit mensuel au cours de l'année;
- \hat{R}_t est la somme des effets perturbateurs et du bruit, estimée à l'aide d'un sous-modèle autorégressif;
- \hat{E}_t est l'estimation de l'erreur aléatoire.

Le sous-modèle trigonométrique représentant le régime annuel moyen du débit est une série de Fourier limitée aux k_1 premiers harmoniques. La valeur P_m de la série au mois m est obtenue par l'expression

$$P_m = \bar{Q} \sum_{i=1}^{k_1} [A_i \sin(\alpha i m) + B_i \cos(\alpha i m)] \quad (9)$$

$$\text{avec } \begin{cases} \bar{Q} = \frac{1}{n} \sum Q_t & (n = \text{multiple de } 12) \\ \alpha = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi}{6} \end{cases}$$

Le terme R_t est engendré à partir du bruit blanc E_t par l'équation aux différences

$$C[Z^{-1}] R_t = D[Z^{-1}] E_t \quad (10)$$

$$\text{où } \begin{cases} C[Z^{-1}] = 1 + C_1 Z^{-1} + \dots + C_n Z^{-n}, \\ D[Z^{-1}] = 1 + D_1 Z^{-1} + \dots + D_n Z^{-n}, \end{cases}$$

et où Z^{-1} est l'opérateur de rétroglissement tel que $Z^{-1} R_t = R_{t-1}$. En notation matricielle, l'équation (10) peut s'écrire plus simplement

$$R_t = \underline{n}_t^T \underline{c} + E_t \quad (11)$$

$$\text{où } \begin{cases} \underline{n}_t^T = [-R_{t-1}, \dots, -R_{t-n}, E_{t-1}, \dots, E_{t-n}], \\ \underline{c}^T = [C_1, \dots, C_n, D_1, \dots, D_n]. \end{cases}$$

Quant aux valeurs de E_t , elles forment une série aléatoire de moyenne nulle et de variance σ^2 , sans corrélation sériale (bruit blanc discret).

Les paramètres A_i et B_i de la relation (9) sont estimés par la méthode des moindres carrés. Etant donné que la série des débits mensuels n'est pas stationnaire, ainsi qu'on l'a montré au paragraphe précédent, la moyenne \bar{Q} et les paramètres A_i et B_i sont déterminés non pas sur l'entièreté de la période d'observation mais uniquement sur un échantillon de S mois qu'on déplace progressivement de mois en mois.

Les paramètres C_i et D_i de la relation (11) sont déterminés par un procédé récurrent proposé par YOUNG (1984) et basé sur la méthode du maximum de vraisemblance approché. Plus précisément, le vecteur \underline{c} est estimé en utilisant l'algorithme

$$\hat{c}_t = \hat{c}_{t-1} - \underline{k}_t \{ \hat{n}_t^T \hat{c}_{t-1} - \hat{R}_t \} \quad (12)$$

$$\text{où } \underline{k}_t = P_{t-1} \hat{n}_t [1 + \hat{n}_t^T P_{t-1} \hat{n}_t]^{-1} \quad (13a)$$

$$\text{et } P_t = P_{t-1} - P_{t-1} \hat{n}_t [1 + \hat{n}_t^T P_{t-1} \hat{n}_t]^{-1} \hat{n}_t^T P_{t-1} \quad (13b)$$

Dans les relations (12) et (13), le vecteur estimé \hat{n}_t est défini comme suit :

$$\hat{n}_t^T = [-\hat{R}_{t-1}, \dots, -\hat{R}_{t-n}, \hat{E}_{t-1}, \dots, \hat{E}_{t-n}] \quad (14)$$

où \hat{E}_t est une estimation de E_t déduite de la relation (11), à savoir :

$$\hat{E}_t = \hat{R}_t - \hat{n}_t^T \hat{c}_t \quad (15)$$

Pour $t = n + 1$, on suppose que les éléments $-\hat{R}_n, \dots, -\hat{R}_1$ sont connus; c'est l'instant initial choisi pour déclencher la procédure d'estimation. On suppose également que les estimations $\hat{E}_n, \dots, \hat{E}_1$ sont nulles c'est-à-dire égales à l'espérance mathématique de la variable. Après une première itération (c'est-à-dire pour $t = n + 1$), une estimation \hat{E}_{n+1} est déduite de (15) et substituée dans (14); d'où

$$\hat{n}_{n+2}^T = [-\hat{R}_{n+1}, \dots, -\hat{R}_2, \hat{E}_{n+1}, 0, \dots, 0].$$

On obtient ensuite \hat{c}_{n+2} à partir de (12) et on répète le procédé jusqu'à la $(2n + 1)$ ème itération, à partir de laquelle le vecteur

$$\hat{n}_{2n+1}^T = [-\hat{R}_{2n}, \dots, -\hat{R}_{n+1}, \hat{E}_{2n}, \dots, \hat{E}_{n+1}]$$

est complet. A chaque itération nouvelle, on introduit dans le vecteur \hat{n}_t une nouvelle estimation \hat{E}_{t-1} et on en retire \hat{E}_{t-n-1} . Pour ce qui est de la matrice P_t , on prend lors de l'itération initiale, une matrice diagonale à éléments grands.

Pour tenir compte de la non stationnarité de la série étudiée, on «oublie» les observations les plus anciennes en accordant un poids plus élevé aux observations les plus récentes. A cet effet, un facteur de pondération est défini par

$$\delta_t = \lambda_0 \delta_{t-1} + 1 - \lambda_0;$$

λ_0 et δ_0 sont de nouveaux paramètres qui déterminent l'importance de cette extinction dans le passé.

Les équations (13) de l'algorithme d'estimation des paramètres du modèle autorégressif doivent dès lors être modifiées comme suit:

$$\underline{k}_t = P_{t-1} \hat{\underline{n}}_t [\delta_t + \hat{\underline{n}}_t^T P_{t-1} \hat{\underline{n}}_t]^{-1}$$

$$\text{et } P_t = \frac{1}{\delta_t} \{ P_{t-1} - P_{t-1} \hat{\underline{n}}_t [\delta_t + \hat{\underline{n}}_t^T P_{t-1} \hat{\underline{n}}_t]^{-1} \hat{\underline{n}}_t^T P_{t-1} \}$$

ADÉQUATION DU MODÈLE

Pour définir complètement le modèle décrit ci-dessus, il convient de déterminer la durée S du filtre utilisé pour l'estimation des paramètres du sous-modèle trigonométrique ainsi que le nombre n de paramètres du sous-modèle autorégressif; le paramètre δ_0 est posé uniformément égal à 0,7 tandis que le paramètre λ_0 est adapté automatiquement à la durée S de telle manière que δ_S s'approche de 1.

Le modèle le plus adéquat sera celui qui conduit à la plus petite variance des erreurs d'estimation. Après prospection d'un certain nombre de possibilités, la solution suivante a été retenue.

La durée S de la séquence glissante utilisée dans la détermination des paramètres du sous-modèle trigonométrique est de 84 mois (7 ans). Les quatre premiers harmoniques de périodes 12, 6, 4 et 3 mois ont été retenus bien que non toujours significatifs. Selon la séquence glissante de référence, la proportion de la variance totale représentée par la somme de ces harmoniques est comprise entre 57 et 81%. Comme il fallait s'y attendre, les valeurs des paramètres A_i et B_i ($i = 1$ à 4) varient notablement au cours de la période 1903-1983.

Dans le sous-modèle autorégressif, il est inutile de prendre plus de quatre paramètres (soit $n = 2$ dans les relations 10 et 11) pour aboutir à des résultats très satisfaisants. Comme les paramètres A_i et B_i , les paramètres C_i et D_i ($i = 1, 2$) varient notablement au cours de la période 1903-1983.

Le graphique de la figure 13, limité aux dernières années de la période de référence, montre comment le modèle ainsi défini permet de reconstituer la série des débits moyens mensuels. Les erreurs d'estimation ont été reportées en bas du graphique. Pour l'ensemble de la période traitée (1910-1983), l'erreur-type s'élève à $\pm 2459 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, c'est-à-dire à $\pm 6,1\%$ de la moyenne du débit observé au cours de cette période. D'une manière générale, on constate que les oscillations annuelles et les oscillations de longue période sont bien représentées par le modèle. Seules les modifications brusques du régime du fleuve, telle la grande crue de 1961-1962, sont tamponnées d'une manière excessive et donnent lieu à des écarts d'estimation importants.

FIABILITÉ DES PRÉVISIONS

Le modèle représenté analytiquement par la relation (8), et structuré comme il vient d'être décrit, est utilisé pour estimer le débit moyen mensuel à des échéances de 1 à 12 mois.

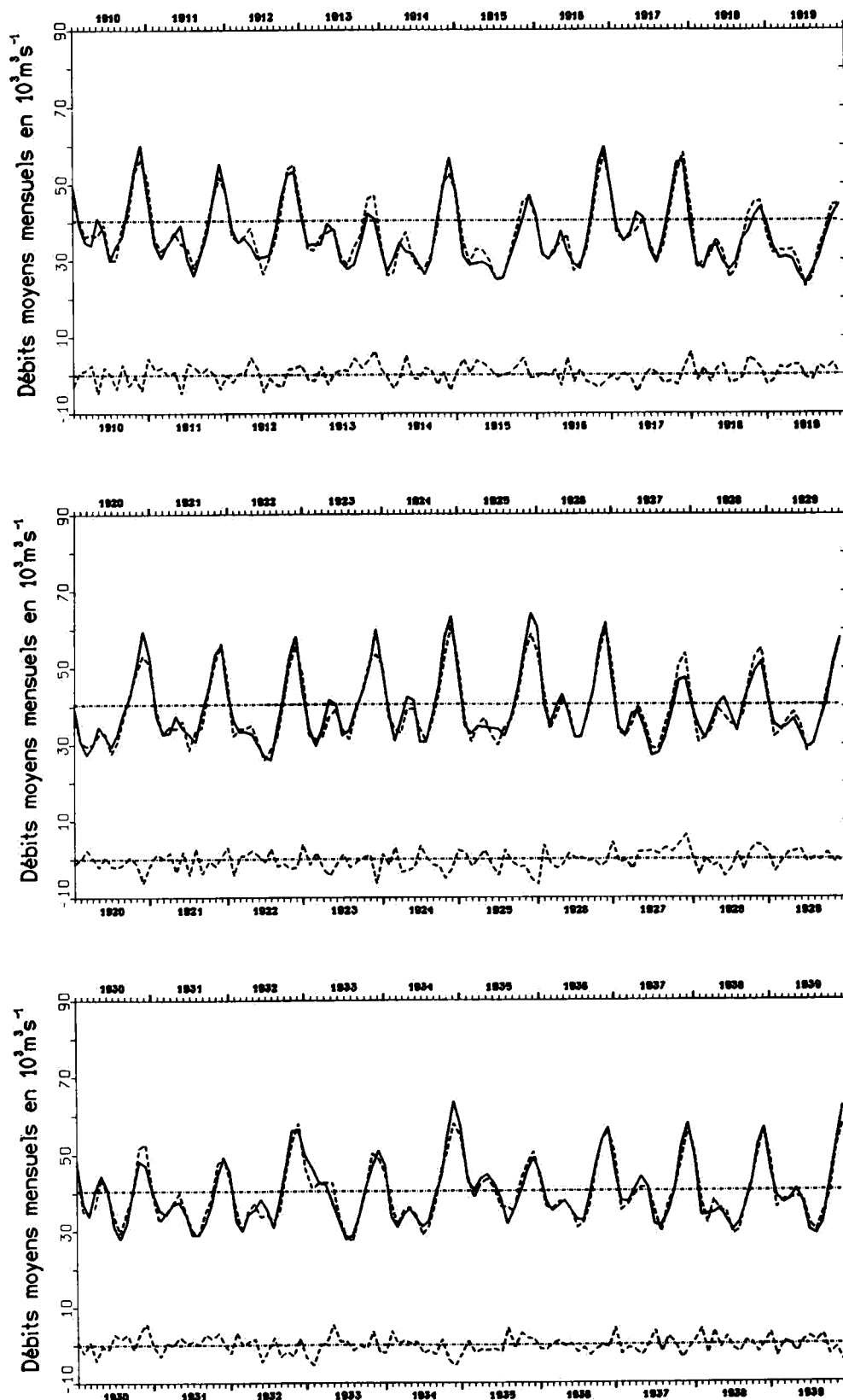
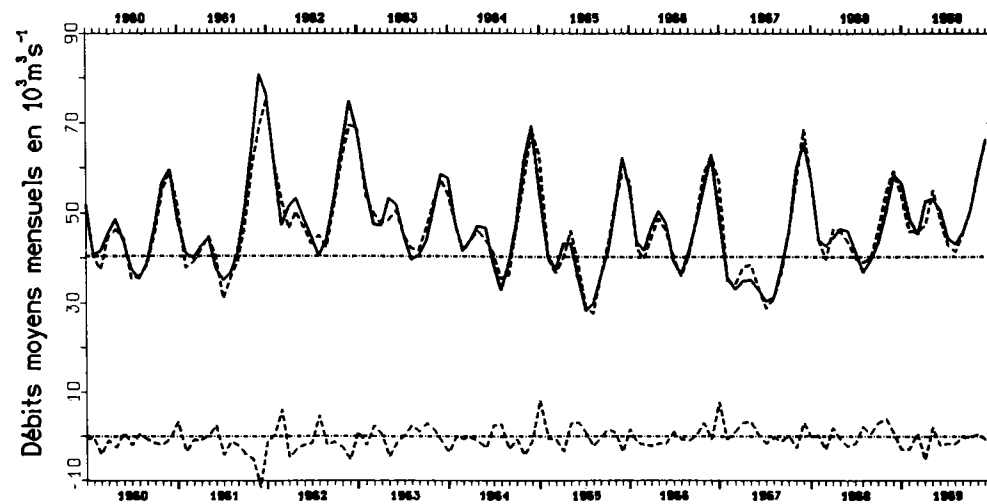
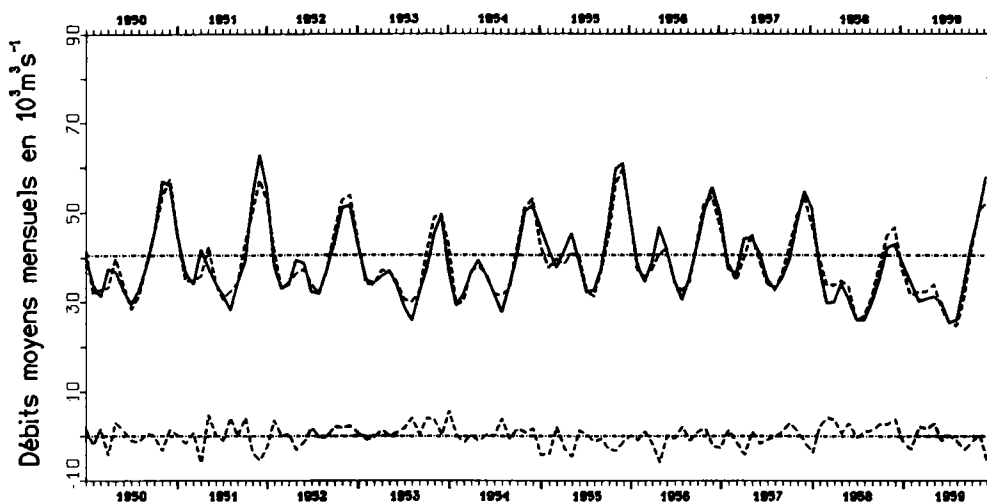
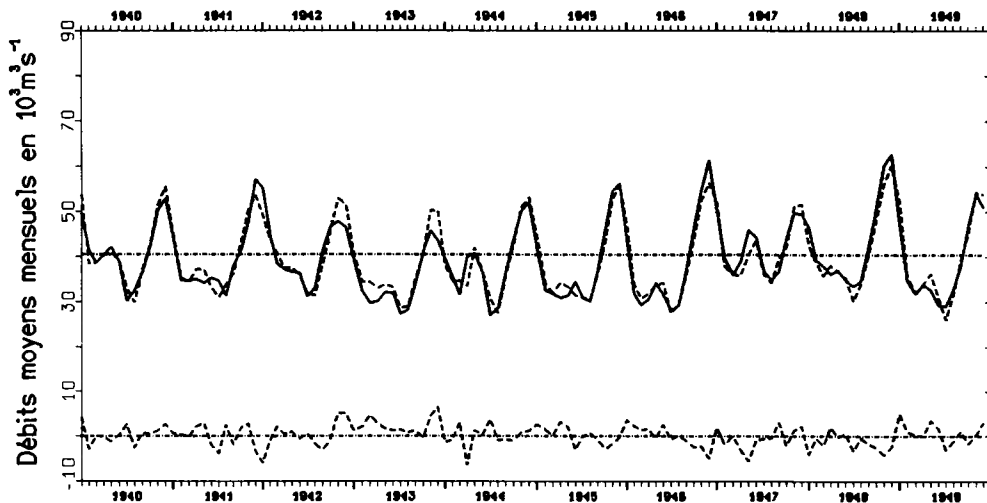
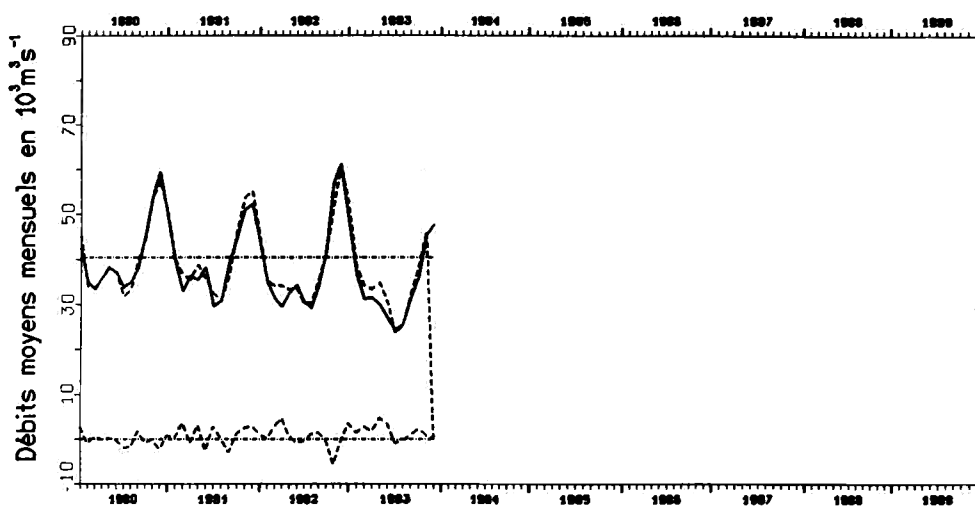
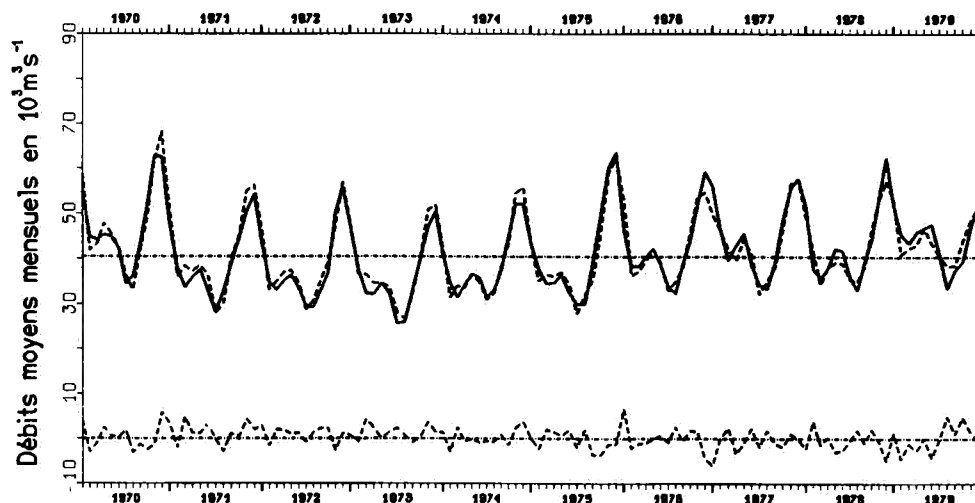


FIG. 13 (pp. 42-44). — Adéquation du modèle d'estimation du débit moyen mensuel. Débit observé en trait plein et débit estimé en trait discontinu; les erreurs d'estimation sont reportées en bas des graphiques.





Il va de soi que, pour les valeurs prévues, l'erreur aléatoire est inconnue et posée égale à son espérance mathématique, c'est-à-dire à zéro.

Pour tester la validité des «prévisions» pouvant être réalisées à partir de la série d'observations disponible, on choisit les données de la période 1903-1909 comme première série de référence. Au point de départ de la prévision (décembre 1909), on dispose donc d'une séquence de 84 débits moyens mensuels sur laquelle on ajuste les paramètres du modèle. Le modèle ainsi calé permet de prévoir les débits pour les 12 mois à venir. Ces prévisions sont comparées aux débits réellement observés au cours des 12 mois de 1910. La séquence de référence est ensuite décalée de mois en mois jusqu'à couvrir la totalité des observations disponibles. Ainsi, à chacun des débits moyens mensuels observés durant la période 1910-1983 on peut comparer 12 valeurs «prévues» correspondant aux 12 échéances de prévision.

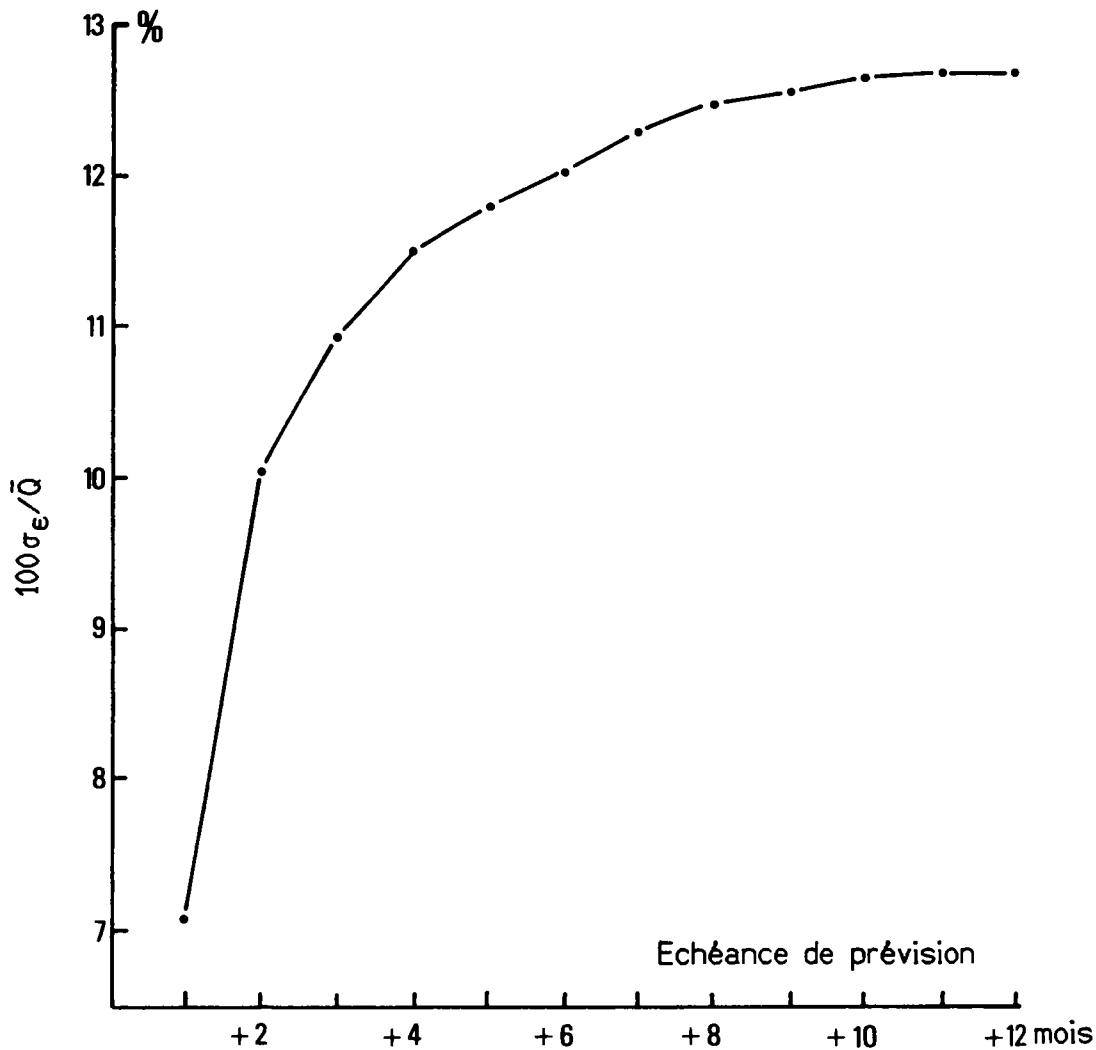


FIG. 14. — Ecart-type des erreurs de prévision en fonction de l'échéance de prévision.

Les écarts entre les prévisions et les observations peuvent dès lors être analysés soit en fonction de l'échéance de prévision, soit en fonction du mois de départ.

Par échéance de prévision il y a, en moyenne, un accord excellent entre les valeurs prévues et les valeurs observées, la moyenne des erreurs ne dépassant jamais 2‰ du débit moyen observé. La dispersion des écarts, qui va évidemment en croissant avec l'allongement de l'échéance de la prévision, reste acceptable (figure 14). Ainsi, pour l'ensemble des prévisions à 6 mois, l'erreur-type s'élève à $\pm 4897 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ c'est-à-dire à $\pm 12,1\%$ du débit moyen mensuel. L'erreur commise peut donc dépasser, une fois sur deux ($0,6745 \times 12,1\%$) soit $\pm 8,2\%$ du débit moyen observé, une fois sur dix ($1,65 \times 12,1\%$) soit $\pm 20\%$ du débit moyen observé, et une fois sur vingt ($1,96 \times 12,1\%$) soit $\pm 23,7\%$ du débit moyen observé.

Les tableaux 15 et 16 fournissent une analyse plus détaillée; pour chaque mois de l'année, les erreurs de prévision y sont rangées en fonction du mois de départ. On peut y retrouver l'influence de la durée de l'échéance de la prévision sur la qualité des résultats. Ainsi, les prévisions des débits moyens de janvier (1^{re} colonne) sont affectées d'une erreur-type d'autant plus importante que les observations disponibles sont plus anciennes ($\pm 3571 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ soit

TABLEAU 15. - MOYENNES DES ERREURS DE PREVISION EN FONCTION DU MOIS DE DEPART ET DE L'ECHEANCE DE PREVISION.

MOIS de départ	Prévisions pour les mois de											
	Janv	Févr	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Janv (*)	292	-668	-154	-91	-56	53	-259	71	-82	-65	127	-347
(%)	0,6	-1,8	-0,4	-0,2	-0,1	0,1	-0,8	0,2	-0,2	-0,1	0,2	-0,6
Févr (*)	465	-72	563	391	362	352	15	301	128	122	312	-194
(%)	1,0	-0,2	1,6	1,0	0,9	0,9	0,1	1,0	0,3	0,3	0,6	-0,3
Mars (*)	296	-205	228	-171	-119	57	-245	103	-66	-45	136	-339
(%)	0,6	-0,5	0,7	-0,5	-0,3	0,1	-0,8	0,3	-0,2	-0,1	0,3	-0,6
Avr. (*)	252	-273	181	59	-8	125	-232	102	-89	-81	97	-395
(%)	0,5	-0,7	0,5	0,2	0,0	0,3	-0,7	0,3	-0,2	-0,2	0,2	-0,7
Mai (*)	207	-309	130	27	132	71	-273	60	-139	-128	52	-438
(%)	0,4	-0,8	0,4	0,1	0,3	0,2	-0,9	0,2	-0,4	-0,3	0,1	-0,8
Juin (*)	221	-289	161	41	174	230	-369	-21	-176	-142	49	-423
(%)	0,5	-0,8	0,5	0,1	0,4	0,6	-1,1	-0,1	-0,5	-0,3	0,1	-0,7
Juil (*)	341	-200	240	114	223	298	-123	345	65	71	222	-289
(%)	0,7	-0,5	0,7	0,3	0,6	0,8	-0,4	1,1	0,2	0,2	0,4	-0,5
Août (*)	196	-324	123	12	136	210	-184	134	-279	-178	30	-446
(%)	0,4	-0,9	0,3	0,0	0,3	0,6	-0,6	0,4	-0,8	-0,4	0,1	-0,8
Sep. (*)	290	-254	196	66	191	261	-147	186	-39	70	194	-323
(%)	0,6	-0,7	0,6	0,2	0,5	0,7	-0,5	0,6	-0,1	0,2	0,4	-0,6
Oct. (*)	246	-286	165	45	167	244	-160	166	-45	-12	155	-398
(%)	0,5	-0,7	0,5	0,1	0,4	0,7	-0,5	0,5	-0,1	0,0	0,3	-0,7
Nov. (*)	177	-286	186	68	194	266	-137	200	-28	33	214	-502
(%)	0,4	-0,7	0,5	0,2	0,5	0,7	-0,4	0,6	-0,1	0,1	0,4	-0,9
Déc. (*)	608	-15	459	327	340	401	1	261	71	78	262	-217
(%)	1,3	0,0	1,3	0,9	0,9	1,1	0,0	0,8	0,2	0,2	0,5	-0,4
Tot. (*)	300	-265	207	74	145	214	-176	159	-56	-23	154	-359
(%)	0,6	-0,7	0,6	0,2	0,4	0,6	-0,5	0,5	-0,1	-0,1	0,3	-0,6

(*), en $m^3 s^{-1}$.

(%), en pour-cent des moyennes observées.

$\pm 7,5\%$ si les débits observés datent de décembre et $\pm 5614 m^3 s^{-1}$ soit $\pm 11,7\%$ s'ils datent de novembre). On remarque en outre que la précision des prévisions effectuées à une échéance donnée peut différer suivant le mois (lire les tableaux suivant les diagonales). Ainsi, pour les prévisions à 6 mois, l'erreur-type s'élève à $\pm 3081 m^3 s^{-1}$ soit à $\pm 8,4\%$ des observations lorsqu'on prévoit un débit de septembre (à partir d'observations de mars) et à $\pm 7203 m^3 s^{-1}$ ou $\pm 12,7\%$ lorsqu'on prévoit un débit de décembre (à partir d'observations de juin).

Dans la pratique, les prévisions à 3 mois peuvent constituer une bonne estimation du débit moyen mensuel. L'erreur-type de ces estimations est de l'ordre de ± 8 à $\pm 12\%$ des valeurs observées sauf pour le mois de janvier. Pour préciser davantage le débit des mois de

TABLEAU 16. - ERREURS-TYPES DES PREVISIONS EN FONCTION DU MOIS DE DEPART ET DE L'ECHEANCE DE PREVISION.

MOIS de départ	Prévisions pour les mois de											
	Janv	Févr	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Janv (*)	6705	2342	3129	4067	4507	4649	3816	3254	3254	4287	5445	7112
(%)	14,0	6,2	9,0	10,9	11,4	12,5	11,9	10,4	9,6	9,9	10,5	12,6
Févr (*)	6624	4935	2304	3617	4331	4583	3758	3130	3338	4127	5398	7082
(%)	13,9	13,0	6,6	9,7	11,0	12,4	11,7	10,0	9,1	9,5	10,4	12,5
Mars (*)	6635	4960	4097	2744	4010	4263	3459	2798	3081	3921	5308	7060
(%)	13,9	13,1	11,7	7,3	10,2	11,5	10,8	8,9	8,4	9,0	10,2	12,5
Avr. (*)	6669	5021	4162	4849	2934	3783	3199	2706	3035	3933	5305	7070
(%)	14,0	13,3	11,9	13,0	7,4	10,2	10,0	8,6	8,3	9,1	10,2	12,5
Mai (*)	6775	5117	4312	4947	5603	2346	2823	2568	3055	4007	5345	7143
(%)	14,2	13,5	12,4	13,2	14,3	6,3	8,8	8,2	8,3	9,2	10,3	12,6
Juin (*)	6834	5168	4335	4960	5662	5667	2184	2859	3258	4171	5456	7203
(%)	14,3	13,6	12,4	13,3	14,4	15,4	6,8	9,1	8,9	9,6	10,5	12,7
Juil (*)	6602	4920	4111	4803	5496	5509	4591	2130	2763	3878	5269	7038
(%)	13,8	13,0	11,8	12,9	14,0	14,9	14,4	6,8	7,5	8,9	10,1	12,5
Août (*)	6613	4934	4133	4818	5514	5506	4606	3518	2034	3407	5115	7002
(%)	13,9	13,0	11,9	12,9	14,0	14,9	14,4	11,3	5,5	7,8	9,8	12,4
Sep. (*)	6447	4800	3934	4651	5377	5417	4515	3415	3483	2370	4615	6625
(%)	13,5	12,7	11,3	12,5	13,7	14,7	14,1	10,9	9,5	5,5	8,9	11,7
Oct. (*)	6259	4738	3867	4565	5281	5344	4427	3340	3473	4211	3241	6099
(%)	13,1	12,5	11,1	12,2	13,5	14,5	13,8	10,7	9,5	9,7	6,2	10,8
Nov. (*)	5614	4552	3798	4492	5216	5338	4433	3355	3469	4316	5514	4109
(%)	11,7	12,0	10,9	12,0	13,3	14,5	13,9	10,7	9,5	10,0	10,6	7,3
Déc. (*)	3571	3872	3664	4288	4927	5077	4226	3386	3597	4421	5612	7275
(%)	7,5	10,2	10,5	11,5	12,5	13,8	13,2	10,8	9,8	10,2	10,8	12,9
Tot. (*)	6341	4678	3864	4447	4969	4879	3911	3067	3205	3958	5173	6789
(%)	13,3	12,3	11,1	11,9	12,6	13,2	12,2	9,8	8,7	9,1	9,9	12,0

(*), en m³s⁻¹.

(%), en pour-cent des moyennes observées.

crue, il conviendrait de procéder à de nouvelles estimations avec des échéances plus courtes.

Le graphique de la figure 15 compare les prévisions à 1 et à 3 mois aux valeurs observées pour les dernières années de la période de référence. Si dans l'ensemble l'accord est satisfaisant, on remarque cependant que les situations exceptionnelles sont mal «prévues». C'est le cas notamment des fortes crues de 1961 et de 1962. Sans doute est-ce dû au fait qu'un accroissement sensible et anormal de l'écoulement s'est produit en un laps de temps très inférieur à la période de 7 ans couverte par les séquences élémentaires progressives à partir desquelles les paramètres du modèle sont estimés.

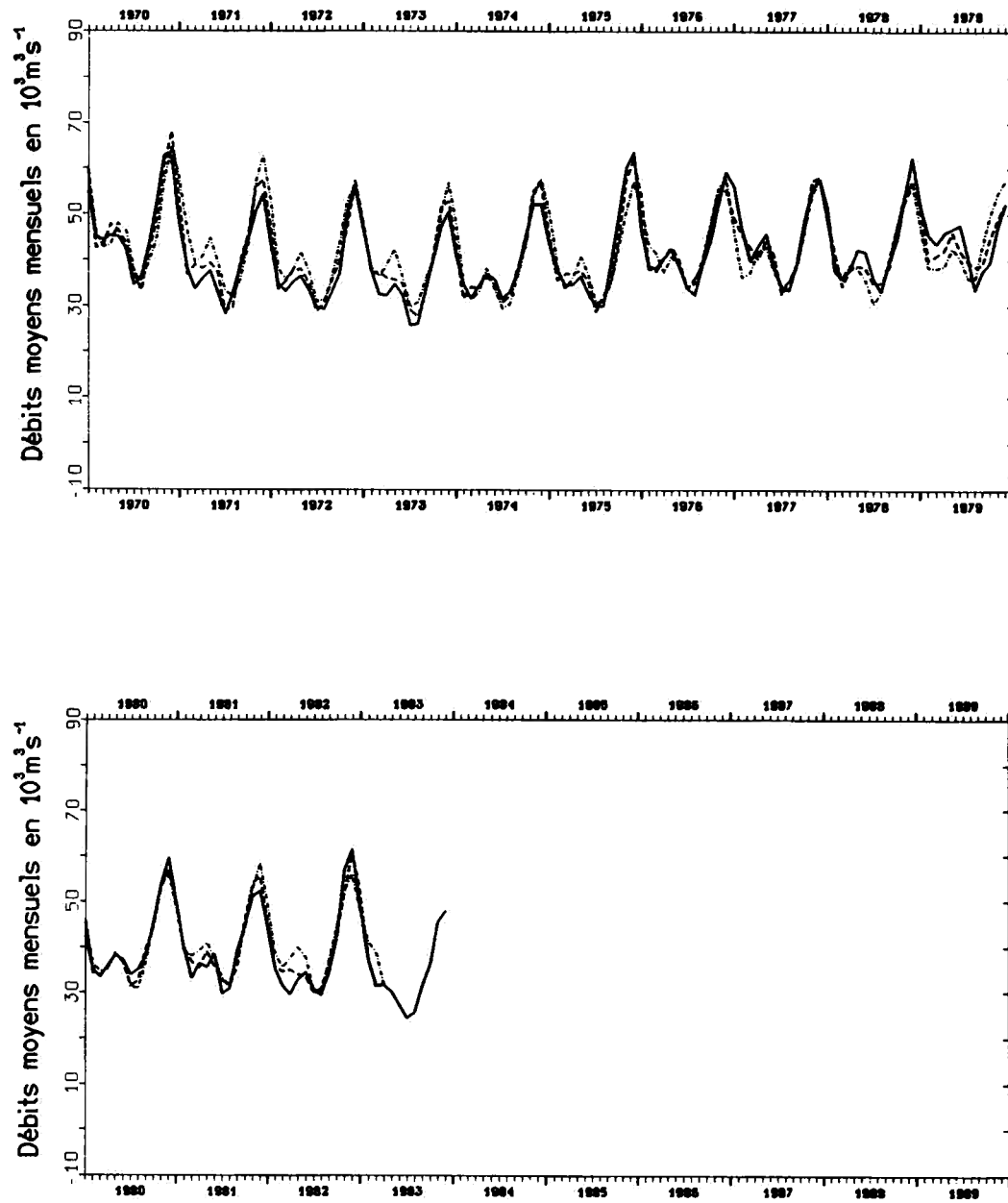


FIG. 15. — Fiabilité des prévisions du débit moyen mensuel. Observations (trait plein), prévisions à un mois (trait discontinu) et à trois mois (traits mixtes).

Références

- BULTOT, F. 1971. Atlas climatique du Bassin congolais, Deuxième partie: les composantes du bilan d'eau. — Publ. I.N.E.A.C., hors série, Bruxelles.
- CHOW, V. T. (ed.) 1964. Handbook of applied Hydrology. — VIII+87 pp., McGraw-Hill, New York.
- DEMARÉE, G. 1987. Application of non-linear regression techniques to the determination of rating curves consisting of one or two branches. — To appear in IRM Pubs., Ser. A, Brussels.
- DE MEYER, F. 1985. Modulation of the solar daily geomagnetic variation. — *J. atmos. terr. Phys.*, **48** (2): 115-130.
- DEVROEY, E. J. 1951. Notice de la carte des eaux superficielles du Congo belge et du Ruanda-Urundi. — *In*: Atlas général du Congo, Académie royale des sciences d'Outre-Mer, Bruxelles.
- MATEBA 1982. Débits liquides et solides dans le bief maritime du fleuve Zaïre: inventaire. — Labor. Recherches hydrauliques, Min. belge des Trav. Publics, Navigabilité du bief maritime du fleuve Zaïre, n° 19.
- MATEBA 1984. Observations limnimétriques à Kinshasa, Matadi et Boma: inventaire 1903-1983. — Labor. Recherches hydrauliques, Min. belge des Trav. Publics, Navigabilité du bief maritime du fleuve Zaïre, n° 22.
- SNEYERS, R. 1975. Sur l'analyse statistique des séries d'observations. — Note technique N° 143, O.M.M., n° 415, Genève.
- VAN GANSE, R. 1959. Les débits du fleuve Congo à Léopoldville et à Inga. — *Bull. Séanc. Acad. r. Sci. colon.*, nouv. sér., **5**: 737-763.
- WITTER, J. V. 1984. Heterogeneity of Dutch rainfall. — Thesis D. Agron., Agricultural University, Wageningen.
- WOLBERG, J. R. 1967. Prediction analysis. — D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton (N.J.).
- YAGLOM, A. M. 1955. The correction theory of processes whose nth difference constitute a stationary process. — *Matem. Sb.*, **37**: 141.
- YOUNG, P. C. 1984. Recursive estimation and time-series analysis. — Springer-Verl., Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.

