

Déficit d'écoulement annuel en pays tropicaux

Annual flow deficit in tropical countries

PAR

J. RODIER

INGÉNIEUR EN CHEF

AU SERVICE DES ÉTUDES D'OUTRE-MER E.D.F.
CHARGÉ DE LA DIRECTION
DES ÉTUDES HYDROLOGIQUES DE L'O.R.S.T.O.M.

ET

M. ROCHE

INGÉNIEUR

AU SERVICE DES ÉTUDES D'OUTRE-MER
D'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

La présente note expose les résultats obtenus par les hydrologues de l'Office de la Recherche Scientifique Outre-Mer et d'Electricité de France.

Dans le cas le plus favorable (grands bassins observés depuis 15 à 20 ans au moins et comportant une vingtaine de postes pluviométriques), déficit d'écoulement et coefficient de ruissellement sont établis année par année et on adopte les valeurs médianes. Pour les bassins moins bien connus, on utilise simplement le module interannuel et la pluviométrie moyenne annuelle. En Afrique Noire, les résultats sont concordants : les déficits moyens interannuels augmentent progressivement du Sahara jusqu'à la zone guinéenne : 850 mm au centre de la région soudanaise à 1 400 mm environ au centre des régions guinéennes. Ils décroissent, ensuite légèrement en descendant vers l'Equateur où ils atteignent parfois 800 mm. Les résultats varient d'une année à l'autre beaucoup plus en raison de la répartition des pluies dans l'année qu'en raison de la hauteur totale des précipitations.

Un certain nombre de particularités locales viennent troubler la régularité des résultats : pentes générales, répartition des pluies en premier lieu, puis réseau hydrographique, nature géologique du terrain, couverture végétale, etc. Cas particulier : la zone deltaïque soudanaise.

Les études faites à Madagascar montrent, par comparaison avec l'Afrique Noire, la très grande influence de la température moyenne sur le déficit d'écoulement.

The present note describes results obtained by hydrologists of the « Office de la Recherche Scientifique, Outre-Mer » and « Electricité de France ».

In the most favourable case (large catchment areas observed for 15 to 20 years at least, and containing about twenty rain gauge stations) the flow deficit and runoff coefficients are established yearly and the median values adopted. For areas with fewer records the interannual module and the mean annual rainfall are used.

In Black Africa the results are in agreement: the mean interannual deficits progressively increase from the Sahara to the Guinean area: 850 mm at the centre of the Soudan area to about 1,400 mm at the centre of the Guinean area. They then decrease slightly towards the Equator where they are sometimes 800 mm. The results vary from year to year, more because of the distribution of rainfall in the year than the total height of rainfall.

A number of local features upset the regularity of the results: general slopes, rainfall distribution, the hydrographic network, the geological character of the area, vegetation, etc. Particular case: the Soudan Delta area.

Studies made at Madagascar are compared with the Black Africa results and show the great influence of mean temperature on the flow deficit.

Les premières études sur le déficit d'écoulement en pays tropicaux, qui ont été entreprises dès 1949 par les hydrologues de l'E.D.F. et de l'O.R.S.T.O.M., avaient un but pratique. Il s'agissait de reconstituer, à partir de précipitations assez bien connues, le régime des bassins prospectés pour lesquels on ne possédait que des données hydrologiques peu nombreuses.

Quelques chiffres ont pu être établis à partir des rares stations étalonnées. Par la suite, nous avons calculé systématiquement le déficit d'écoulement pour toutes les stations de l'*Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer*. Nous nous proposons dans le présent rapport d'expo-

ser nos résultats et de dégager dans la mesure du possible certaines caractéristiques générales.

C'est essentiellement la régularité des variations du déficit, depuis le Sahara jusqu'à la zone guinéenne, qui nous a conduit à l'adopter pour caractériser les bilans hydrologiques. Le « coefficient d'écoulement », sous l'influence plus directe de la pluviométrie, varie plus dans l'espace d'une année à l'autre. Les lois qui le régissent sont moins nettes que celles du déficit.

Il faut noter qu'en pays tropicaux le déficit d'écoulement ne se heurte pas aux mêmes difficultés qu'en France métropolitaine. L'étendue généralement importante des bassins à étudier,

O. R. S. T. O. M.

24 AVR. 1969

Collection de Référence

n° B178 B

l'absence de phénomènes nivo-glaciaires, la régularité relative du climat, l'existence d'un cycle annuel bien délimité par une saison sèche marquée sont autant de facteurs favorables à une détermination exacte du déficit.

Nous ajouterons que les données utilisées, tant au point de vue hydrologique (modules) que du point de vue météorologique (précipitations), ont subi un examen critique sévère et ont été mises en œuvre par des chercheurs connaissant bien les régions dans lesquelles ils ont eux-mêmes travaillé.

Deux exemples mettront en relief l'ordre de grandeur des erreurs auxquelles on peut s'attendre :

Pour la Sanaga, les premières estimations pluviométriques ont été faites à partir des relevés bruts de l'O.N.M. : hauteur d'eau moyenne annuelle des précipitations, 1.600 mm; des erreurs graves ayant été constatées dans les relevés, un nouveau calcul a été fait après étude critique : les corrections sur la moyenne ont été seulement de 50 mm.

De même pour le bassin de l'Oubangui, les modifications apportées à la moyenne après transformation complète du mode de calcul ont été très faibles (1.540-1.550 mm au lieu de 1.525 mm).

En ce qui concerne les mesures de débits, les conditions d'écoulement généralement favorables des rivières africaines permettent, dans les cas moyens, d'obtenir une précision de l'ordre de 3 à 5 %. Les courbes de tarage, d'abord provisoires, ont été précisées par la suite. Deux exemples donneront une idée des corrections ainsi effectuées.

Le module moyen de l'Oubangui est passé de 4.533 m³/s à 4.386 m³/s après deux corrections de la courbe de tarage.

Pour le Milo à Kankan, l'étalonnage provisoire donnait un module de 178 m³/s. L'étalonnage correct actuel donne 195 m³/s (*).

On peut donc conclure que pour un bassin assez étendu, plus de 3 à 500 km², sur lequel on dispose de quelques pluviomètres, il est possible, en terrain peu accidenté, de déterminer le déficit annuel avec une précision suffisante.

MODE DE DÉTERMINATION DU DÉFICIT D'ÉCOULEMENT ANNUEL

Pour les grands bassins présentant de longues périodes d'observations limnimétriques ou pluviométriques, le déficit d'écoulement est calculé

(*) Nous sommes loin d'obtenir une telle précision sur les débits des cours d'eau de Madagascar, des Antilles et de la Réunion.

TABLEAU I. — Niger à Koulikoro
(Bassin versant : 120.000 km²)

DÉFICITS ANNUELS D'ÉCOULEMENT
(Valeur médiane : 1.100 mm)

ANNÉE	MODULE m ³ /s	LAME d'eau écoulée	HAUTEUR de pluie	DÉFICIT
		mm	mm	mm
1927	1.912	505	1.800	1.295
1928	2.143	563	1.545	982
1929	1.884	496	1.570	1.074
1930	2.025	533	1.540	1.007
1931	1.714	452	1.470	1.018
1932	1.762	465	1.695	1.230
1934	1.466	386	1.425	1.039
1935	1.451	382	1.335	953
1941	1.236	325	1.370	1.045
1942	1.025	270	1.340	1.070
1943	1.221	322	1.460	1.138
1944	1.012	266	1.295	1.029
1947	1.293	340	1.390	1.050
1948	1.584	418	1.535	1.117
1949	1.412	372	1.598	1.226
1950	1.510	397	1.420	1.025
1951	2.093	551	1.814	1.263
1952	1.693	446	1.546	1.100

année par année et les résultats annuels sont groupés dans un tableau tel que le tableau I relatif à la station de Koulikoro sur le Niger. Ce tableau présente un certain nombre de valeurs aberrantes, il est peu probable que ces écarts correspondent à des erreurs sur les hauteurs de précipitations (il faudrait une erreur de 3 à 400 mm à une station pour donner lieu à un écart notable sur la pluviométrie moyenne) ou à des erreurs sur les hauteurs limnimétriques. Koulikoro est un port important et les variations de niveau du Niger y ont toujours été suivies de très près. La majeure partie des valeurs aberrantes correspondent soit à des précipitations très élevées ou présentent dans le temps une répartition différente de la répartition normale.

Nous avons opéré ainsi pour le Niger, la Sanaga et l'Oubangui.

Lorsque la période d'observations limnimétriques ou pluviométriques est trop courte, nous comparons la moyenne pluviométrique interannuelle au module interannuel. On notera que ces deux valeurs ne sont pas déterminées obligatoirement pour la même période. Le procédé reste cependant légitime à condition d'éliminer du calcul les relevés antérieurs à 1927. On introduirait ainsi les fortes pluviométries de la période 1923 à 1926 dans les régions soudaniennes.

Les déficits ne portant que sur un ou deux ans d'observations ne seront utilisés qu'avec la plus grande prudence.

DÉFICIT D'ÉCOULEMENT EN AFRIQUE NOIRE FRANÇAISE

Le tableau II résume les valeurs trouvées.

Nous verrons que certains facteurs considérés comme secondaires tels que : pente, forme du réseau hydrographique, nature de la couverture végétale, constitution géologique du sol, peuvent avoir une influence très forte sur la valeur du déficit. Mais nous ne considérons pour commencer que l'influence des conditions climatologiques générales : précipitations et températures.

En première approximation, ces conditions varient en Afrique noire française en fonction des latitudes. Une bande de territoire comprise entre deux parallèles correspond à peu près à un même climat.

Nous avons porté sur le graphique I, en abscisse, les latitudes des centres de gravité des bassins observés, en ordonnée les déficits d'écou-

TABLEAU II
Régime tropical classique

	PLUVIOMÉTRIE moyenne	DÉFICIT	OBSERVATIONS
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	
A.O.F. :			
Sénégal à Bakel..	885	780 ⁽¹⁾	mixte (subdésertique)
Sénégal à Gouina.	1.041	877	mixte (tropical transition)
Bani à Douana...	1.235	1.020	
CAMEROUN :			
Mayo-Kébi à Famou	895	805	
Chari à Fort- Archambault. . .	1.050	1.010 ⁽¹⁾	mixte (tropical transition)
Bénoué à Garoua.	1.090	930	

(1) Bassins très allongés ou comportant de vastes zones d'inondation.

lement : les points représentatifs peuvent être groupés sur trois courbes : A, A' et B.

Notons que la presque totalité des points aberrants correspond à des valeurs particulières des

TABLEAU II bis.
Régime tropical de transition

	PLUVIOMÉTRIE moyenne	DÉFICIT	OBSERVATIONS
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	
A.O.F. :			
Niger à Koulikoro	1.550	1.100	mixte (tropical pur)
Niger à Siguiri...	1.640	1.175 ⁽¹⁾	
Niger à Kouroussa	1.665	1.306	
Niandan à Baro..	1.875	1.250	
Konkouré au pont de Téliélé	2.100	1.320	
A.E.F. CAMEROUN :			
Logone à Bongor.	1.340	1.130 ⁽²⁾	mixte (tropical pur)
Logone à Lai....	1.350	1.085 ⁽²⁾	mixte (tropical pur)
Pendé à Doba....	1.350	1.050 ⁽²⁾	
Bahr-Sarah à Moïssala	1.380	1.176 ⁽¹⁾	
Logone à Moundou	1.440	1.110	
M'Bali à Bouali..	1.500	1.110	
Oubangui à Bangui	1.550	1.280 ⁽²⁾	
Wina au Lahoré..	1.550	985 ⁽³⁾	
M'Béré à M'Béré.	1.565	1.045 ⁽¹⁾⁽³⁾	
Sanaga à Edéa...	1.650	1.140	mixte. (équatorial transition)
Lom à Bétaré-Oya	1.830	1.280 ⁽¹⁾	
DAHOMEY :			
Mono à Athiémé.	1.300	1.165	
Ouémé au pont de Savé	1.225	1.045	
Okpara à Kaboua.	1.200	1.120 ⁽¹⁾	
Zou à Atchéribé.	1.100	1.030	

(1) Résultats portant sur une ou deux années d'observations.
(2) Bassins très allongés ou comportant de vastes zones d'inondation.
(3) Bassins de montagne.

TABLEAU II *ter*.
Régime équatorial de transition

	PLUVIOMÉTRIE moyenne	DÉFICIT	OBSERVATIONS
A.O.F. :	mm	mm	
Bia à Ayamé....	1.560	1.280	
A.E.F. CAMEROUN :			
Nyong	1.480	1.250	
Sanga à Ouesso..	1.540	1.203	mixte (tropical transition)
Fouloukary à Kimpanzou. . . .	1.550	930	
RÉGIME ÉQUATORIAL			
A.E.F. :			
Djoué à la prise d'eau	1.550	850	
Bouenza à Moukoulou. . . .	1.700	960 ⁽¹⁾	
Léfini à Boembé.	1.850	894 ⁽¹⁾	
(1) Résultats portant sur une ou deux années d'observations.			

facteurs secondaires : bassin très allongé, pente très faible, etc. Ils auraient été éliminés si nous n'avions choisi que des bassins versants classiques de superficie moyenne : quelques milliers de km², relativement ramassés, assez peu accidentés, avec lit d'inondation relativement peu développé.

La forme des courbes observées s'explique facilement. Les deux facteurs principaux du déficit d'écoulement sont l'évaporation et le régime pluviométrique.

Supposons en première approximation que les répartitions des précipitations au cours de l'année soient identiques, le déficit croît avec l'évaporation et avec la hauteur pluviométrique. Or, on peut dire que H croît du Sahara à l'équateur (voir carte n° 1).

Au contraire, l'évaporation annuelle sur nappes libres décroît du Soudan (2.500 mm) à l'équateur (peut-être 800 à 900 mm). Les deux facteurs principaux jouent donc en sens contraire. On doit donc du Sahara à l'équateur voir les déficits croître, passer par un maximum, puis décroître. C'est ce que l'on constate sur le tableau I et encore mieux sur le graphique 1.

La courbe A concerne l'A.O.F. (Dahomey non compris). Nous voyons que les points représentatifs y sont assez bien groupés. Le déficit croît de 800 mm vers Bamako à un maximum de 1.250 mm à 150 km au sud de Kankan.

Deux catégories de points à déficit anormalement élevé :

1° Les grands bassins : Niger à Bamako, Sénégal à Bakel et surtout Niger à Mopti, avec lits d'inondation très étendus, très faibles pentes, effluents;

2° Les bassins à répartition de pluies particulièrement étalée (pourtour Fouta-Djallon) : Niger à Kouroussa et Konkoure.

Il est à noter que du 14° degré au 9°, l'étalement des pluies dans le temps augmente régulièrement, venant ajouter son action à celle de la pluviométrie croissante, mais cette tendance joue également de l'est vers l'ouest dans le Fouta-Djallon.

A partir du 9° degré en A.O.F., il semble que le déficit passe par un palier entre 1.300 et 1.400 mm. Sur la Bia, la hauteur des précipitations annuelles est analogue à celle du Niandan. La végétation plus dense, la pente un peu plus faible et les pluies moins concentrées seraient plus favorables à une forte évaporation. Or, le déficit est presque le même. Cela tient au fait que l'évaporation est beaucoup plus faible que dans le bassin supérieur du Niger.

En A.E.F. et au Cameroun (courbe B), les déficits croissent depuis le Lac Tchad, mais avec un notable décalage sur la courbe de l'A.O.F. (courbe A). Ce décalage correspond à un climat plus continental par suite de l'effet d'écran des montagnes du Cameroun.

Le déficit passe par un maximum voisin de 1.300 mm correspondant à 5 ou 6° : limite du régime tropical de transition et du régime équatorial de transition; il décroît alors assez rapidement. La décroissance déjà notable pour la M'Bali, est très marquée vers l'équateur (Lobé, Foulakary). Il semble que le déficit d'écoulement soit de l'ordre de 800 mm pour la latitude O.

Un certain nombre de points s'écartent de la courbe B :

1° Les grands bassins : Chari, Nyong, Sanga : le Nyong Moyen, avec sa très faible pente, les pluies étalées, la végétation très dense (les pertes par évaporation pour ce cours d'eau doivent être assez voisines des pertes à la surface d'eau li-

bre), le Chari, dont tout le bassin oriental est constitué par des cours d'eau traversant péniblement d'immenses marécages;

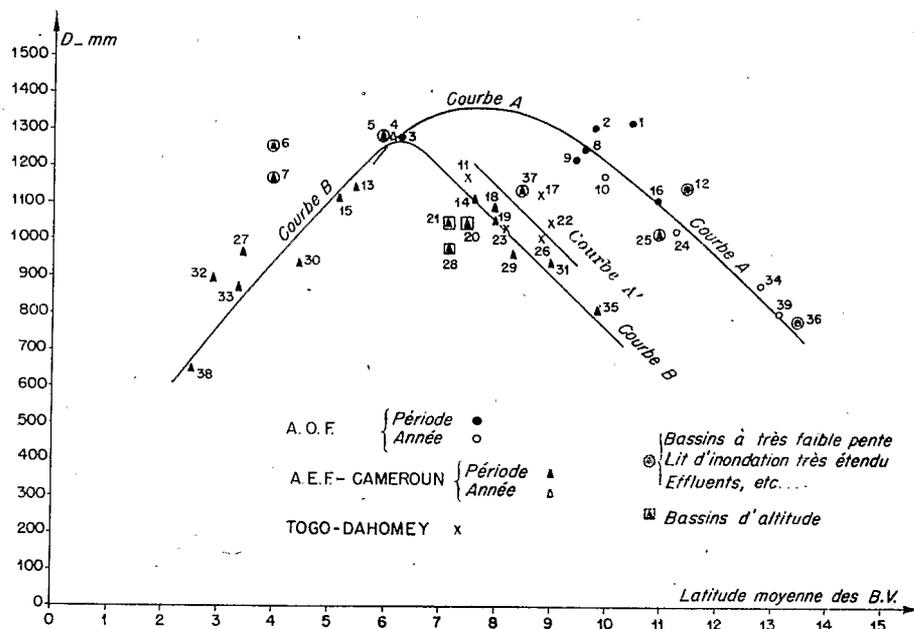
2° La Wina, seul bassin d'altitude (1.200 m).

La dispersion est forte dans les régions équatoriales. En effet, les hauteurs d'eau annuelles varient très largement : de 3.500 à 1.400 mm. D'autre part, le déficit d'écoulement ne peut pas

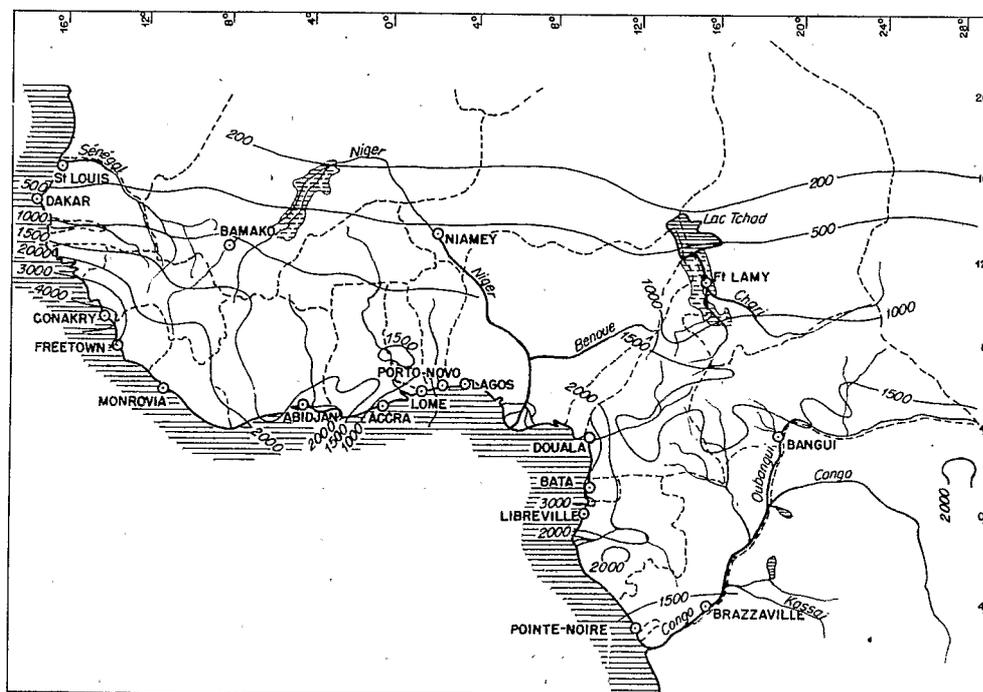
être déterminé avec précision : pluviomètres peu nombreux, relevés limnimétriques portant sur une courte période.

En regard de l'amplitude des variations de hauteurs d'eau annuelles, le faible écart entre les déficits d'écoulement : 700 à 1.000 mm semble tout à fait remarquable.

Autre cause de dispersion : nous avons établi



GRAPHIQUE 1. — Déficit d'écoulement en fonction de la latitude.



CARTE 1. — AFRIQUE NOIRE FRANÇAISE. Isoyhètes annuelles.

le diagramme en prenant l'équateur géographique comme axe de symétrie. Or, l'axe de symétrie, s'il y en a un, est peut-être légèrement décalé.

Pour l'Est de l'A.O.F., et en particulier le Dahomey (faibles précipitations annuelles avec répartition très étalée), nous obtenons une courbe A' au-dessous de la courbe A (A.O.F.) et un peu au-dessus de la courbe B (A.E.F.).

Or, à latitude égale, les précipitations sont les mêmes au Dahomey que sur le Logone ou la Benoue. Si l'on veut éliminer l'influence des zones d'inondation, forte pour la courbe B, presque nulle pour la courbe A' il faudrait faire subir à la courbe B un décalage dont l'exemple de la M'BÈRÉ dépourvue de lit d'inondation peut donner une idée. Il subsiste néanmoins une différence de 150 à 200 mm imputable uniquement à la différence de répartition des précipitations.

Nous avons cherché à rattacher de façon plus étroite les déficits aux températures et à la pluviométrie.

L'indice d'aridité même calculé à partir des moyennes diurnes de température ne caractérise pas un climat, tout au moins en ce qui concerne le bilan hydrologique. En effet, on trouve le même indice pour Kouroussa, Brazzaville et Cotonou qui correspondent à des conditions climatologiques très différentes.

Par contre, il semble que la formule indiquée par M. TURC dans son rapport :

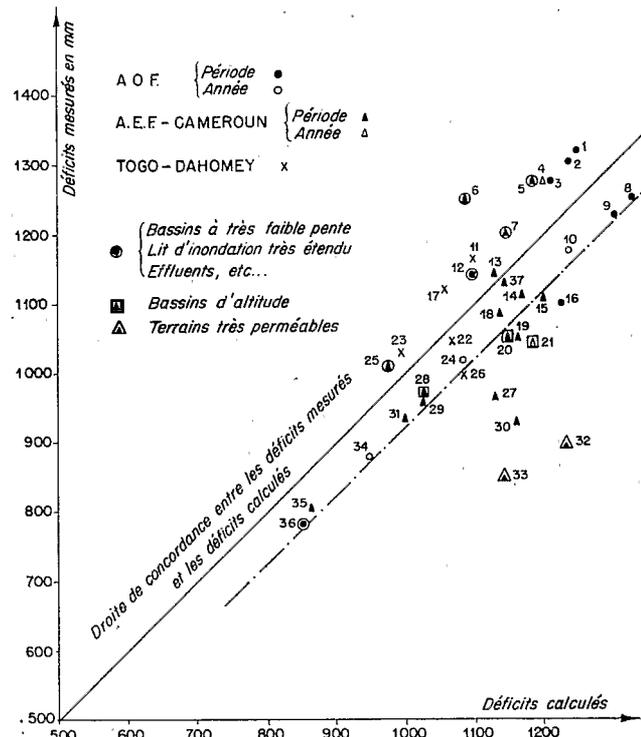
$$D = \frac{H}{\sqrt{0,9 + \frac{H^2}{L^2}}}$$

donne de bons résultats jusqu'à la limite de la zone guinéenne. Nous avons porté sur le graphique 2 en abscisse les déficits calculés par la formule, en ordonnée les déficits mesurés effectivement.

La majeure partie des points aberrants correspond à l'influence de facteurs secondaires et la dispersion est faible pour les bassins situés au nord du 4° parallèle.

Il semble que la formule donne systématiquement des résultats un peu forts : l'écart moyen serait de l'ordre de 75 mm. Cet écart est dû probablement à des valeurs trop élevées pour le facteur L qui correspond sensiblement à l'évaporation sur nappes d'eaux libres comme tendent à le montrer nos études sur l'évaporation. Les valeurs calculées semblent fortes par rapport aux évaporations que nous avons pu mesurer.

Nous retrouvons parmi les déficits aberrants par défaut, ceux des bassins de la zone équatoriale à laquelle manifestement la formule s'adapte imparfaitement, surtout sur les bassins à forte pluviométrie tels que la Lobé.



GRAPHIQUE 2. — Correspondance entre les déficits mesurés et les déficits calculés par la formule de TURC.

D'autre part, une série de cours d'eau présente des déficits plus élevés. Ce sont :

- 1° Les cours d'eau dahoméens et même certains cours d'eau de Guinée, par suite de l'étalement des pluies;
- 2° Les cours d'eau à très faible pente tels que le Nyong et l'Oubangui;
- 3° Les cours d'eau à large zone d'inondation tels que le Niger à Mopti, le Chari à Archambault, le Chari à Fort-Lamy.

En somme, la formule s'applique surtout à la zone soudanaise et à des bassins de moyenne dimension et de conditions géologiques normales.

A partir des valeurs déjà calculées et en utilisant pour les interpolations la formule de TURC dans les régions soudanaises et guinéennes, nous avons établi une carte provisoire des déficits d'écoulement, carte 2.

Nous avons supposé que chaque point de cette carte représente un bassin de 5.000 à 10.000 km², assez ramassé, de relief et de constitution géologique correspondant à la moyenne de la région environnante, à lit majeur peu important, à sol imperméable.

Cette carte ne peut être utilisée sans correction pour les bassins inférieurs à 2.000 km², qui peu-

vent présenter des singularités (sol, forme, pente).

Pour les très grands bassins, il faut tenir compte des pertes dans les zones d'inondation du cours inférieur.

Elle met en évidence :

- 1° L'allure générale des courbes d'égal déficit qui suivent sensiblement les parallèles avec une certaine inclinaison de l'ouest à l'est (influences continentales); parallélisme assez bon pour la région soudanaise de l'A.O.F.;
- 2° La forte inclinaison de la courbe 1.300 mm en A.O.F. due aux fortes précipitations sur la Basse-Guinée le Léoné et le Libéria. Cette courbe correspond à la limite nord de la zone où la forêt tropicale serait relativement stable;
- 3° L'allure tourmentée des courbes au Togo et au Dahomey correspond à une anomalie pluviométrique;
- 4° L'effet d'écran des monts du Cameroun sur le bassin de la Bénoué où la pluviométrie est nettement plus faible;
- 5° Les déficits relativement faibles du Centre-Cameroun et de l'Oubangui occidental (altitude assez élevée);

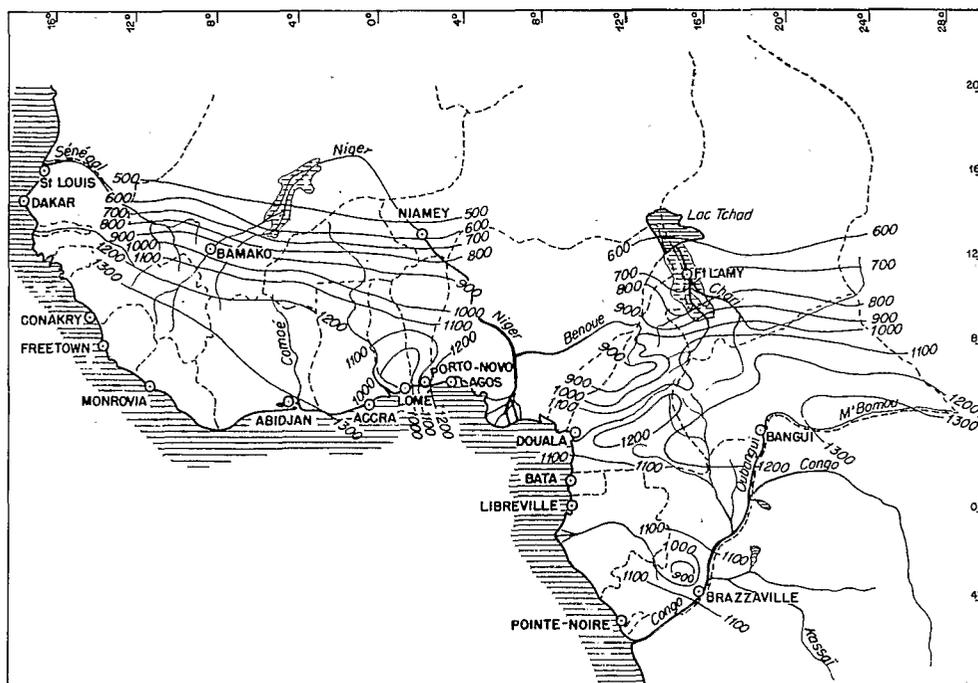
6° L'allure complexe des courbes vers le 4° parallèle en rapport avec la complexité des isohyètes;

7° Les faibles déficits d'écoulement des Plateaux Batékés au nord de Brazzaville. Les eaux sont absorbées par une masse de sable de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur et mises à l'abri de l'évaporation. Les cours d'eau de cette région (Djoué et surtout Léfini) peuvent compter parmi les plus réguliers du monde.

Nous avons renoncé à tracer des courbes d'égal déficit pour le Gabon et le Nord du Moyen-Congo, régions encore trop mal connues.

Enfin, vers la limite nord de la zone soudanaise, le coefficient d'écoulement devient très faible : 4 % pour le Chari à Archambault. Encore l'essentiel de cet écoulement provient-il de la région sud, mieux arrosée et plus accidentée.

Le déficit est alors facile à déterminer; il correspond à peu près à la hauteur de précipitations annuelles. Mais il ne peut rendre aucun service pour le calcul de l'écoulement. Le coefficient d'écoulement serait beaucoup plus intéressant. Il varie beaucoup suivant les dimensions du bassin et surtout suivant la pente. Nous avons comparé les coefficients d'écoulement pour deux bassins voisins, l'un situé dans les montagnes du Nord-Cameroun : le Mayo-Binder à Monbaroua, 1.100 km², l'autre situé en plaine, la Tandjilé à



CARTE 2. — AFRIQUE NOIRE FRANÇAISE. Courbes d'égal déficit.

Bologo, 6.000 km². Le coefficient d'écoulement est de 20 à 25 % dans le premier cas, 6 % dans le second.

Ces coefficients sont élevés. Ils diminuent rapidement dès que la hauteur des précipitations annuelles descend en dessous de 800 mm et leurs variations respectives suivant la pente deviennent de plus en plus fortes. Il n'y a bientôt plus d'écoulement. Le ruissellement existe dans la partie amont des bassins où la pente est relativement forte; puis les cours d'eau à peine formés se perdent dans des marécages ou des mares d'hivernage dès leur arrivée en plaine.

Les grands fleuves tels que le Niger et le Nil traversent péniblement cette zone où ils laissent une partie importante de leurs apports dans des deltas intérieurs.

Pour les grands fleuves, on doit tenir compte des pertes par évaporation sur les nappes d'eau qui couvrent les plaines d'inondation lors de la crue.

Ces pertes sont élevées; un exemple typique est fourni par la Bénoué, constituée par le Mayo-Kébi et la Haute-Bénoué. Les pertes sont telles entre les deux stations amont et la station aval, qu'elles absorbent, et au-delà, les apports du bassin versant résiduaire. La presque totalité des apports envahissant la plaine d'inondation est perdue. Ainsi le débit total des deux stations amont est en août de 954 m³/s en moyenne, alors qu'on ne trouve que 835 m³/s à la station aval. La récupération à la fin de la crue est très faible.

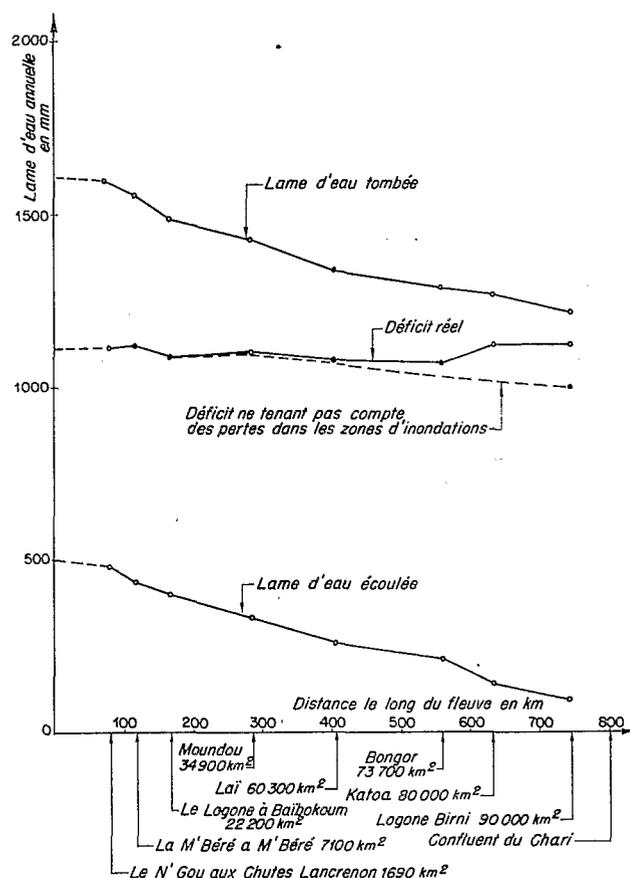
Les pertes sont encore plus importantes lorsque le fleuve présente des effluents : Sénégal, Niger, Logone, Chari, Nil. Un fleuve peut arriver à perdre 40 % de ses apports à la traversée de la région des effluents.

A titre indicatif, nous montrons dans le graphique 3 comment varie le déficit d'écoulement depuis la source jusqu'à la zone des effluents pour le Logone. Les valeurs portées correspondent malheureusement à des moyennes et non au déficit des bassins partiels successifs.

Le déficit d'écoulement pour des fleuves se dirigeant vers le nord croît dès que l'on atteint la zone des plaines d'inondation et la région des effluents, alors que le déficit d'un bassin partiel du cours inférieur tel qu'il résulterait de notre carte, devrait être nettement plus faible que le déficit du cours moyen et, à plus forte raison, que celui du cours supérieur. L'application brutale des résultats de la carte n° 2 conduirait donc à un déficit global décroissant, ce qui est faux pour ces grands bassins.

Ces deux derniers bassins permettent d'apporter les corrections nécessaires pour utiliser la carte à l'estimation du déficit d'écoulement d'un bassin supérieur à 10.000 km².

En ce qui concerne l'influence des facteurs se-



GRAPHIQUE 3. — LOGONE. Année moyenne. Variation du déficit d'écoulement en aval.

condaires, nous ne pouvons que donner des indications qualitatives.

La pente moyenne du bassin a une grande influence : le coefficient d'écoulement peut passer en zone guinéenne de 28 % pour un petit bassin de plaine à peut-être 35-40 % pour un petit bassin de montagne; en zone sahélienne, de 3 à 4 % en plaine à 20-25 % en montagne. Certains grands bassins à forme particulièrement allongée, tels que le Nyong à M'Balmayo, l'Oubangui ou la Sanga, ont une pente moyenne particulièrement faible. Ils admettent des déficits d'écoulement relativement élevés; l'écart sur le déficit d'écoulement d'un bassin normal peut atteindre dans ce cas 100 à 150 mm.

L'influence de la couverture végétale est assez difficile à séparer des effets de la pluviométrie. L'extension des zones cultivées est très faible; par suite, la densité de la couverture végétale, en première approximation, croît avec la pluviométrie. Les études sur les petits bassins actuellement en cours devraient donner quelques indications précises. La comparaison des premiers

résultats du petit bassin de Bangui avec ceux des bassins du Nord-Cameroun montre pour des pentes comparables un freinage très net des crues par la végétation.

La nature géologique du sol n'exerce une influence sensible que pour les terrains très perméables. Les Plateaux Batékés constituent à peu près le seul exemple connu. Dans ce cas, la plupart des petits bassins présente un déficit élevé. Au contraire, les cours d'eau importants, Djoué, Léfini, ont un déficit faible : l'eau s'infiltré immédiatement et est soustraite partiellement à l'évaporation. Il ne semble pas cependant que la différence avec un bassin imperméable soit très grande. La comparaison avec la Foulakary, dont le bassin est à peu près imperméable, montre que la différence serait de l'ordre de 50 mm.

On peut déduire de ce qui précède quelques principes directeurs en vue d'effectuer, sur les valeurs données par notre carte provisoire, les corrections nécessaires chaque fois que l'on se trouvera en présence d'un bassin de caractère s'écartant un peu des conditions normales. Il sera nécessaire, pour les bassins inférieurs à 1.500-2.000 km², d'observer la plus grande prudence. L'étude analytique, même sommaire, de quelques averses, ne serait pas superflue.

DÉFICIT D'ÉCOULEMENT A MADAGASCAR

Il n'est pas possible de dégager pour Madagascar des règles générales pour les raisons suivantes :

Les régimes hydrologiques sont très variés : on rencontre presque autant de types qu'en Afrique noire pour une superficie beaucoup plus faible. Il y a peu de grands bassins. Enfin, les études hydrologiques, difficiles par suite des fortes vitesses et de la rapidité des crues, n'ont pu être étendues à l'île entière que depuis deux ans.

Seule, la région de Tananarive est assez bien connue.

Il a été possible d'établir des valeurs moyennes du déficit pour trois bassins des Hauts-Plateaux :

La Varahina-Sud à Tsiazompaniry,
283 km²..... 620 mm
La Mandraka, 57 km²..... 660 mm
L'Ikopa à Bévomanga, 4.450 km².... 870 mm

Le déficit un peu anormal de la dernière station est dû aux pertes dans les rizières de la plaine de Tananarive. Pour des bassins de cet ordre, recevant 1.400 à 1.500 mm, on devrait prévoir : $D = 800$ mm.

La Varahina-Sud présente une pente moyenne

plus forte. Quant à la Mandraka, la pente est forte, mais le bassin est beaucoup plus arrosé, ce qui explique un déficit plus élevé qu'à Tsiazompaniry.

A altitude égale et à pluviométrie égale, les déficits semblent plus faibles qu'en Afrique noire. Ceci tient d'une part à des températures moyennes plus faibles et à une couverture végétale beaucoup moins dense.

La Wina, dans l'Adamaoua (Cameroun) peut fournir une indication intéressante à ce sujet; son bassin présente des caractéristiques : altitude, relief, précipitations annuelles, végétation, voisines de celles des Hauts-Plateaux de Madagascar. Or, le déficit sur la Wina est de 900 à 1.000 mm au lieu de 800-850 mm. Cette différence tient presque exclusivement aux températures : température moyenne diurne à N'Gaoundéré : 29°; température diurne à Tananarive : 24°.

La comparaison serait plus intéressante pour des régions de basse altitude et, en particulier, pour le Sud et le Sud-Ouest de l'île. Malheureusement, les déficits d'écoulement n'ont pu être calculés que pour l'année 1951-1952.

Le tableau III résume les résultats obtenus. D'une façon générale, les déficits sont beaucoup

TABLEAU III. — *Déficits d'écoulement dans le Sud et le Sud-Ouest de Madagascar (Année 1951-1952)*

	PRÉCIPITATIONS annuelles	DÉFICIT d'écoulement	SUPERFICIE du B.V.
	mm	mm	km ²
Mangoky à Vondrove	1.050	800	51.600
Onilahy à Tongobory	870	700	29.000
Ménarandra à Tranoroa	695	610	5.425
Mandraré à Amboasary	770	573	12.650
Mananara à Bévia	880	690	1.132

plus faibles que pour les régions d'Afrique présentant une pluviométrie équivalente (zone sahélienne). Cet écart est dû aux pentes plus fortes de la grande Ile et surtout aux températures diurnes plus faibles.

Les résultats donnés par la formule de TURC sont trop forts de 50 mm pour les rivières du Sud en 1951-1952. Sur les Hauts-Plateaux on observe des écarts du même ordre, sauf pour les bassins très arrosés : Mandraka (précipitations annuelles 1.900 mm), déficit mesuré 6 à 700 mm; déficit TURC : 940 mm. Des différences de cet ordre ont été observées en Afrique noire pour les bassins très arrosés.

CONCLUSION

Cet exposé montre que si l'on dispose de quelques données sur les régions tropicales, nos connaissances sont encore bien fragmentaires sur le déficit d'écoulement dans les régions équatoriales et surtout sur le coefficient d'écoulement dans la région sahélienne. C'est pourtant dans cette région du globe que l'étude du bilan hydrologique présente le plus grand intérêt pratique.

Il semble que, pour l'influence des facteurs secondaires, l'étude des petits bassins pourra permettre de dégager assez rapidement des règles générales.