

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE MER
20, rue Monsieur
PARIS VII°

COTE DE CLASSEMENT n° 408

HYDROLOGIE

ETAT ACTUEL DES ETUDES D'EVAPORATION EN AFRIQUE NOIRE FRANCAISE

par

M. ROCHE

ETAT ACTUEL des ETUDES d'EVAPORATION
en AFRIQUE NOIRE FRANCAISE

par M. ROCHE
Ingénieur Hydrologue à ELECTRICITE DE FRANCE

Pour l'hydrologue, le problème des pertes d'eau par restitution à l'atmosphère sous forme de vapeur se pose, généralement, sous deux aspects bien caractérisés. Le premier se rapporte au bilan d'une retenue et concerne l'évaporation proprement dite à partir d'une nappe d'eau libre. C'est un cas apparemment simple ; nous verrons ce qu'il en est réellement. Le second aspect du problème touche le bilan en eau d'un bassin versant et met en oeuvre non seulement l'évaporation superficielle des eaux libres mais aussi l'évaporation du sol et la transpiration des végétaux : on désigne l'ensemble de ces phénomènes sous le nom d'évapotranspiration.

Il existe des cas intermédiaires entre ces deux cas généraux : rizières, prairies ou forêts inondées par exemple. De même, l'évaporation sur un bassin versant présente des modalités différentes suivant qu'il s'agit d'un sol nu relativement perméable ou d'un bassin forestier.

I - L'EVAPORATION sur NAPPES d'EAU LIBRE

A - PRINCIPES de MESURES -

La méthode idéale consisterait à effectuer, sous différents climats, des bilans hydrologiques de retenues ou de lacs existants. L'équation du bilan peut s'écrire :

$$V_E = V_A + HS - V_I - ES - V_R$$

dans laquelle, pour une période donnée :

- V_E désigne le volume écoulé à l'exutoire de la retenue
- V_A le volume des apports provenant des tributaires et de l'écoulement superficiel et souterrain sur la périphérie de la cuvette
- H la hauteur moyenne des précipitations sur la retenue
- S la superficie de la retenue : il faudra éventuellement tenir compte de ses variations

V_I le volume des infiltrations

E la hauteur moyenne d'évaporation

V_R le volume d'eau emmagasiné dans la retenue durant la période : ce terme peut être positif ou négatif.

Cette équation permet de déterminer l'évaporation si les autres termes sont connus. Certains sont relativement faciles à mesurer : V_E , V_A (tout au moins en ce qui concerne les tributaires), H , S et V_R . Il n'en est pas de même de V_I et l'estimation de l'évaporation n'est possible que si la retenue est pratiquement imperméable et, par suite, V_I négligeable devant ES . Il faut, enfin et surtout, que l'évaporation ne soit pas un terme différentiel devant le débit d'alimentation du réservoir, auquel cas il pourrait être de l'ordre des erreurs de mesures sur les différents facteurs. Le cas le plus favorable, et malheureusement très rare, est celui d'un réservoir naturel fermé ne comportant ni exutoire, ni alimentation importante de nappes. C'est ainsi que le calcul a été tenté avec succès sur le Lac TCHAD par le Service Hydrologique de l'O.R.S.T.O.M. (Etude A. BOUCHARDEAU). Des résultats intéressants ont été obtenus également sur des mares fermées de petites dimensions au site du KENIE (SOUDAN)

Une seconde méthode consiste à mesurer l'évaporation sur des réservoirs de très faible capacité, construits spécialement à cet usage et pouvant être rendus étanches. Le bilan de ces réservoirs ne comporte plus que les termes ES , HS et V_R , les deux derniers étant mesurés directement.

Les résultats de ces réservoirs, "cuves" ou "bacs évaporatoires", doivent être interprétés, car ils ne donnent pas directement l'évaporation sur une retenue. Seules, des études comparatives des évaporations sur bacs et des bilans de retenues peuvent permettre de déterminer les coefficients à adopter pour transformer les évaporations sur bacs en évaporations sur retenues.

Même ainsi simplifiés, les réseaux de stations d'évaporation ne sont pas assez denses pour permettre d'évaluer directement l'évaporation en un point quelconque des territoires. C'est pourquoi nous nous sommes attachés, pour tous nos postes d'observations, à mesurer en même temps que l'évaporation ses facteurs climatologiques principaux, afin de pouvoir éventuellement extrapoler les résultats des bacs à des stations météorologiques où ces facteurs sont mesurés. Le choix des éléments à prendre en compte a été guidé par des considérations essentielle-ment pratiques, les facteurs conditionnels incorporés

dans les formules de corrélation devant faire normalement l'objet d'observations systématiques dans un grand nombre de stations météorologiques.

Ce choix interdit pratiquement l'étude de formules d'évaporation basées sur la théorie de la turbulence ou du bilan d'énergie et nous conduit à l'application de la loi de DALTON corrigée par un terme tenant compte de la vitesse du vent dont l'influence a été considérée comme linéaire. On aboutit à une relation de la forme :

$$E = a (1 + bV) D$$

dans laquelle on a :

- E évaporation journalière (en mm/j)
- V vitesse moyenne du vent (en m/s)
- D déficit moyen de saturation (en millibars)

a et b sont des coefficients d'ajustement.

Dans un second stade, lorsque nous disposerons d'un nombre suffisant d'observations, nous nous proposons d'étudier l'influence de la pression atmosphérique.

Le déficit de saturation est défini comme la différence entre la tension de vapeur saturante de l'eau à la température de l'air ambiant et la tension de vapeur d'eau réelle existant dans l'atmosphère. Il serait plus correct, pour l'évaporation, de remplacer le premier terme par la tension de vapeur saturante à la température superficielle de l'eau de la retenue ou du bac, mais ce dernier facteur n'est pas fréquemment observé. L'écart serait important dans les régions tempérées où les variations de température sont grandes d'une saison à l'autre ; il l'est moins en zone tropicale, malgré de fortes amplitudes diurnes, si l'on considère seulement des moyennes sur un cycle journalier.

B - MISE en OEUVRE des MESURES d'EVAPORATION -

Jusqu'en 1956, les stations d'évaporation d'AFRIQUE NOIRE FRANCAISE ont été installées au fur et à mesure des nécessités imposées par des études particulières telles que l'aménagement d'importants réservoirs. A partir de 1957, une normalisation a été adoptée et un réseau d'études systématiques comportant 11 stations a été

installé à titre d'essai en AFRIQUE OCCIDENTALE FRANCAISE sur les bassins expérimentaux. Les stations déjà en activité ont continué à fonctionner comme par le passé.

Nous décrivons brièvement, ci-dessous, l'équipement et le mode opératoire adoptés :

1°) Mesure de l'évaporation :

Les bacs sont constitués par des réservoirs parallélépipédiques en tôle soudée de 15/10 à 2 mm, de section horizontale carrée (1 m²) et de 0,60 m de profondeur. Les bords sont renforcés par un cadre en cornières soudées dont les ailes horizontales sont rabattues vers l'extérieur pour éviter les rejaillissements des gouttes de pluie. Une pointe fixe retournée permet de régler le niveau de l'eau à 0,10 m au-dessous de la bordure. Les bacs sont peints en gris neutre avec une peinture mate.

Si une station ne comporte qu'un seul bac, ce dernier est enterré de façon que le plan d'eau soit au niveau moyen du sol. Divers dispositifs assurent la protection contre les batraciens, les animaux domestiques ou sauvages et les animaux fouisseurs, sans gêner l'action du vent. Un bac perché, c'est-à-dire posé à quelques centimètres au-dessus du sol, est parfois adjoint au bac enterré en vue d'études comparatives. Enfin, si l'on dispose d'une certaine étendue d'eau, le bac peut être amarré à un radeau et prend le nom de "bac flottant" : l'exploitation d'un tel bac est, en général, difficile.

Les observations se font en mesurant le volume d'eau nécessaire pour ramener le niveau de l'eau à affleurer la pointe. Cette méthode, dite "volumétrique", présente le double avantage de maintenir dans la cuve un niveau pratiquement constant et de réduire les erreurs de lecture, l'erreur faite au cours d'une observation étant partiellement compensée lors de l'observation suivante. Sur un bac de 1 m², 1 litre d'eau rajouté correspond à 1 mm d'évaporation ; il n'y a donc pas de calcul à faire et c'est la raison qui nous a fait adopter cette normalisation plutôt que celle du bac "Colorado" de 1 yard carré. Néanmoins, les dimensions de ces deux types de bacs sont suffisamment voisines pour que les mêmes coefficients de passage du bac à la retenue puissent être utilisés.

Chaque bac est doublé d'un appareil permettant d'effectuer les corrections de pluie. Dans les stations anciennes, nous avons adopté la solution, séduisante a priori, du "bac à huile" : la pluie était mesurée au

moyen d'un bac de mêmes caractéristiques et installé dans les mêmes conditions que le bac évaporatoire, mais dans lequel l'eau est recouverte d'une mince pellicule d'huile empêchant toute évaporation. Une identité presque parfaite des conditions de réception des pluies est ainsi réalisée, mais l'exploitation du bac à huile nécessite beaucoup de soins.

Nous préférons utiliser le système plus rudimentaire du "pluviomètre au sol", simple pluviomètre type "Association" installé dans une fosse à proximité du bac évaporatoire, de telle façon que la collerette du récepteur soit au niveau des bords du bac.

Les stations sont dotées également d'un évaporomètre à pastille (PICHE ou O.N.M.) installé dans l'abri météo. Les observations effectuées sur ces appareils permettent éventuellement de se rattacher, par analogie, à des stations météorologiques officielles.

2°) Mesure des températures :

Chaque station dispose d'un thermomètre au 1/10°C pour la température de l'air (abri météo), d'un thermomètre flottant d'égale précision pour la mesure de la température superficielle de l'eau, d'un thermomètre à maxima et d'un thermomètre à minima.

3°) Mesure de l'humidité relative :

Dans la mesure du possible, on utilise un psychromètre à aspiration qui, employé avec précaution, permet les mesures les plus précises. Les thermomètres, sec et humide, sont gradués en 1/5°C. D'après les récents travaux de l'O.N.M. sur les psychromètres à ventilation forcée, on peut admettre que l'humidité relative est donnée par la formule :

$$U \% = 100 \frac{(e_w)_{T_h} - 0,66 (T_s - T_h) \frac{P}{1.000}}{(e_w)_{T_s}}$$

U humidité relative en %

$(e_w)_{T_h}$ tension de vapeur saturante à la température du bulbe humide (millibars)

$(e_w)_{T_s}$ tension de vapeur saturante à la température du bulbe sec (millibars)

5°) Programme d'observations (heures locales) :

L'évaporation sur le bac et à l'évaporomètre PICHE, le vent, la pluie au sol, l'humidité, les températures de l'air et de l'eau sont observés deux fois par jour à 7 h et à 19 h. En outre, la température superficielle de l'eau, la température de l'air et l'humidité relative sont mesurées à 11 h, 15 h et 22 h.

Les observations sont consignées sur des tableaux imprimés à cet effet. Des feuilles de dépouillement sont mises à la disposition des observateurs. Sur ces feuilles, les résultats sont présentés en moyennes nocturnes (19 h du jour précédent à 17 h) et en moyennes diurnes (7 h à 19 h). Toutes les moyennes sont calculées par planimétrage des courbes de variations des grandeurs physiques correspondantes, opérations qui doivent être effectuées au jour le jour.

C - RESULTATS DEJA OBTENUS -

1°) Valeurs de l'évaporation sur bac :

Nous avons déjà indiqué que le réseau normalisé d'A.O.F. comporte 11 stations réparties dans les différents territoires : MOUDJERIA, TIN ADJAR, KOUNBAKA, KANKAN, TIMBIS (Hts-Plateaux du FOUTA), BOULA (Ht-NILO), FERKESSEDOUGOU, MAN, IFOU, GAGARA, ALOKOTO (bassin de la NAGGIA).

Ces stations n'ont commencé à fonctionner qu'en 1957. D'autres bacs ont été exploités en A.O.F. depuis quelques années, soit à titre provisoire, soit de façon continue. Nous en donnons la liste suivante qui ne concerne que les stations dont nous avons pu disposer des relevés : FELOU, KENIE, DOUNFING, TERO, LHOTO, FOMI, KINDIA, SOUAPITI. D'assez nombreux bacs ont été installés dans les vallées du SENEGAL et de l'OUEME.

La plupart de ces stations ont été installées par des chefs de mission qui avaient besoin des résultats bruts pour la mise au point des projets d'aménagement. Les résultats sont intéressants mais les études climatologiques annexes, effectuées en même temps que les mesures d'évaporation, ont été très sommaires : elles doivent être utilisées avec prudence pour l'étude des corrélations entre l'évaporation et ses facteurs conditionnels.

En AFRIQUE EQUATORIALE FRANCAISE et au CAMEROUN, aucune station n'a encore été normalisée. Il en résulte un réseau un peu disparate, ce qui ne veut pas dire que les observations manquent de qualité : en effet, les dispositions essentielles concernant l'installation des bacs ont été respectées et les facteurs conditionnels mesurés de façon peut-être incomplète mais correcte. La normalisation sera adoptée lorsqu'elle aura suffisamment fait ses preuves en A.O.F. : FADA, BOL, FORT-LAMY, DOUGUIA, BOGO, MAROUA, LAI, GAROUA, BANGUI, YAOUNDE, SOUNDA, BRAZZAVILLE.

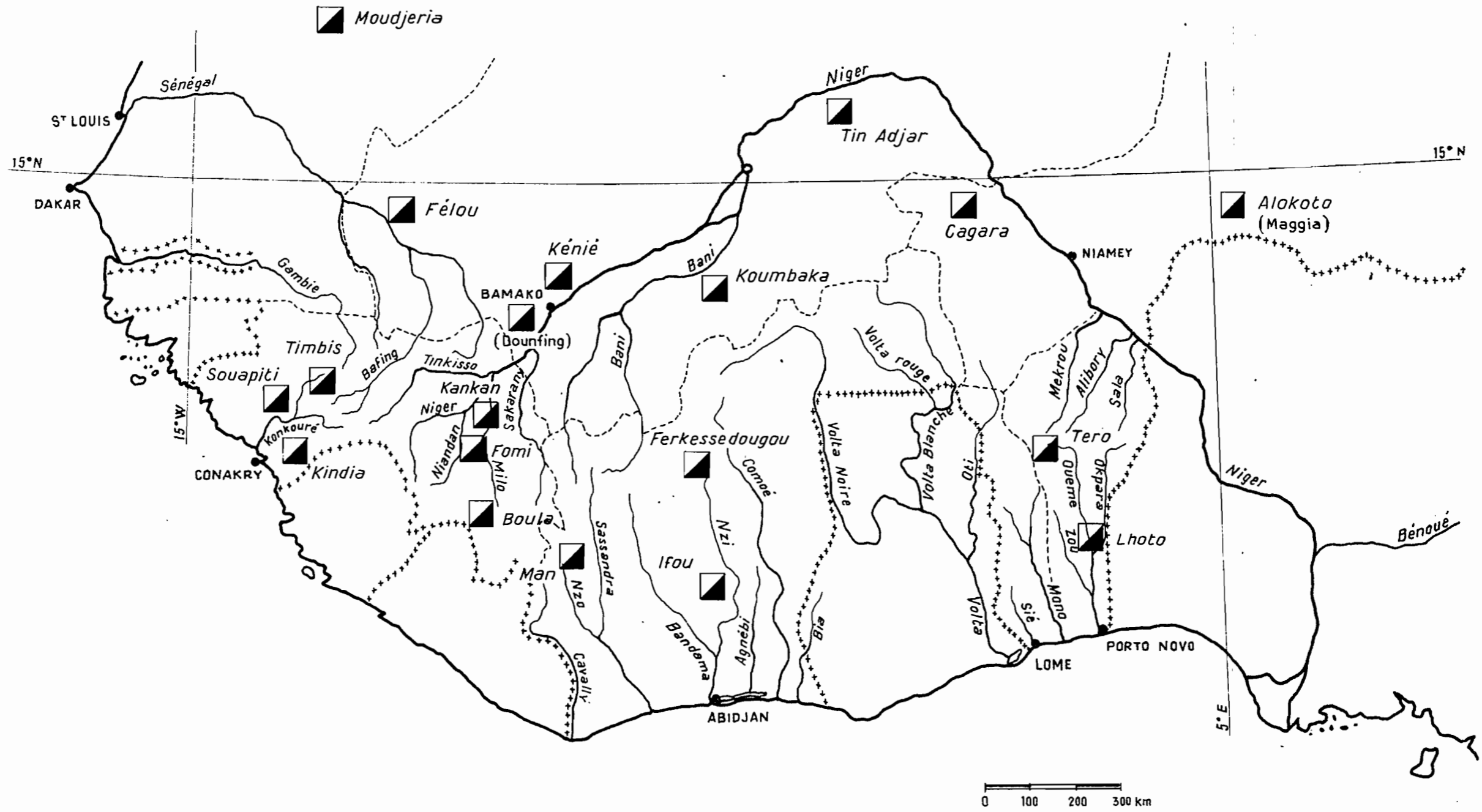
Les détails concernant ces différentes stations sont donnés en annexe.

Toutes les observations effectuées jusqu'à ce jour ne nous sont pas encore parvenues et, parmi celles qui ont été rassemblées, toutes n'ont pas été complètement exploitées. Cela tient, en grande partie, à ce que les études sur l'évaporation ont été longtemps considérées comme secondaires par rapport à d'autres tâches plus urgentes. Cependant, dès 1954, on a compris la nécessité de telles études : un premier rapport, présenté aux troisièmes journées de l'Hydraulique (ALGER 1954) par MM. RODIER et TOUCHEBEUF de LUSSIGNY, avait fait, à cette époque, le point sur les données succinctes que nous possédions. Une nouvelle mise au point a été présentée par M. BOUCHARDEAU au Congrès de TORONTO en 1957 pour les zones sahélicennes et subdésertiques.

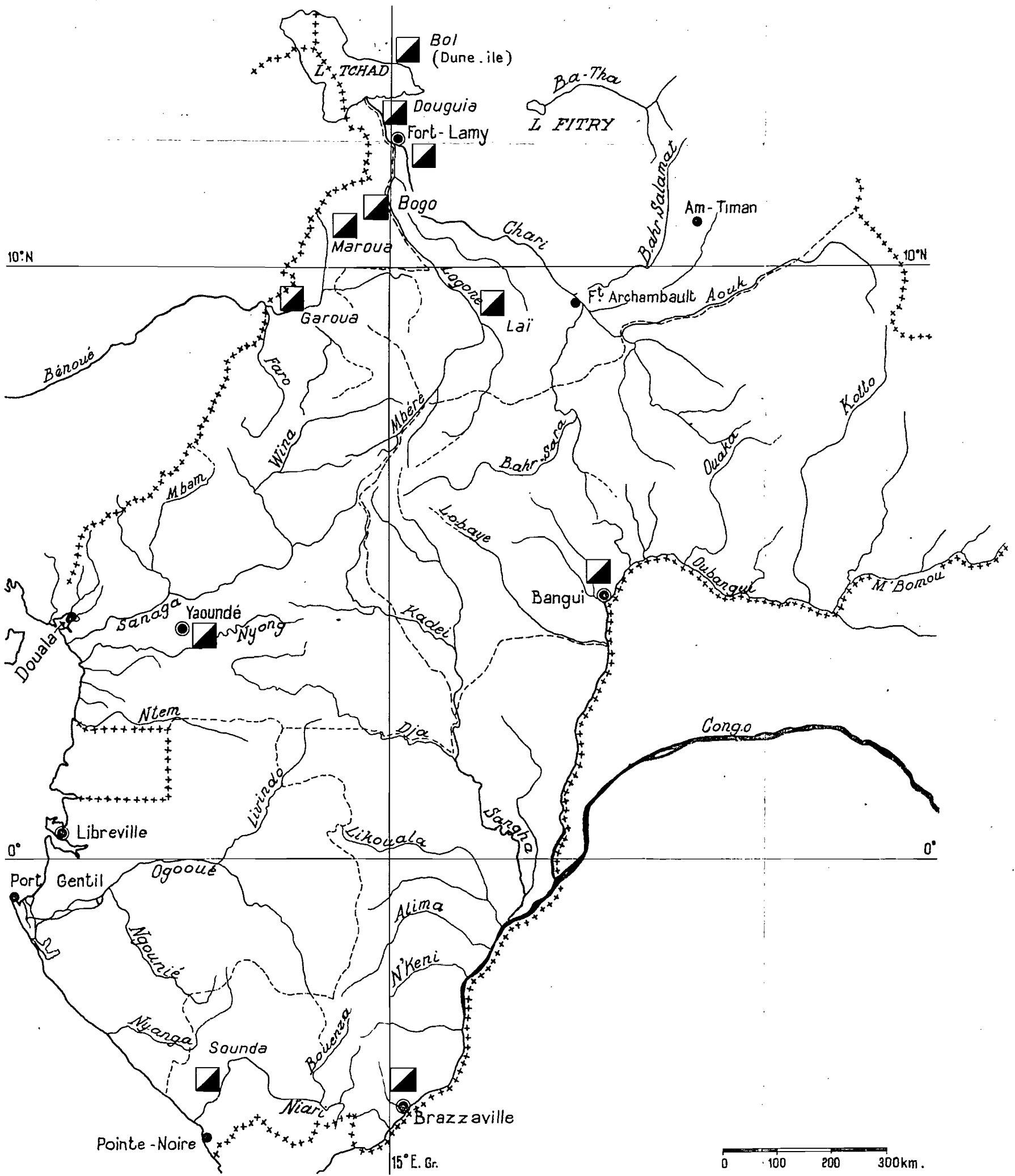
Les résultats obtenus ont été rassemblés dans le tableau I qui donne chaque mois l'évaporation moyenne journalière, en mm par jour, calculée sur la période d'observations, ainsi que les totaux annuels moyens obtenus sur la période. La position géographique des différents postes est donnée par la carte n° 1 pour l'A.O.F. et la carte n° 2 pour l'A.E.F.

Sur le tableau I, les stations sont classées approximativement par aridité décroissante. Il est à noter que la notion d'"aridité" correspond moins, dans ce cas, à une valeur plus ou moins élevée des précipitations, qu'à la valeur de l'humidité relative et de la température moyenne de l'année. C'est ainsi que la station de l'IFOU, par exemple, révèle une évaporation beaucoup plus faible que celle de SOUAPITI, bien que les précipitations y soient beaucoup moins élevées. Mais, la station de l'IFOU, dans une région où la mousson est installée presque à demeure, ne bénéficie que d'un ensoleillement réduit et, de plus, la couverture forestière de la région entretient

Situation des stations d'évaporation en A.O.F



Situation des stations d'évaporation en A.E.F



E V A P O R A T I O N

TABLEAU I

Moyenne mensuelle journalière en mm

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Hauteur: total: annuelle: mm	Années
FADA						12,2	10,8	12,0						1957
MOUDJERIA						14,0	10,4	9,0	10,8					1957
TIN-ADJAR	8,1	8,2	9,4	11,0	11,6	11,3	9,3	7,2	7,6	8,4	8,7	7,8	3.300	56-57
BOL (dune)	9,8	10,4	12,2	11,7	10,8	9,0	7,4	6,6	6,7	9,7	9,9	9,6	3.460 ⁽¹⁾	56-57
BOL (île)	6,0	7,1	7,7	9,0	7,5	8,4	7,2	6,5	4,7	6,7	6,8	6,7	2.560	1957
Lac TCHAD	4,3	3,6	5,9	4,7 ⁽¹⁾	6,2 ⁽¹⁾	7,0	4,7	5,5	5,2	10,5 ⁽¹⁾	8,8	4,6	2.285	53 à 56
FORT-LAMY	5,8	7,8	7,8	7,9	7,1	5,5	3,5	3,2	4,9	8,3	5,9	6,9	2.265	1956
KOUMBAKA						9,1	5,8	4,1	4,2					1957
FELOU					8,4	6,3	4,5							1952
DOUGUIA	6,4	7,4	9,9	10,0	8,9	8,0	5,5	3,1	4,0	6,0	7,3	6,8	2.530	54-55-56
BOGO	8,0	8,8	10,1	10,5	10,7	6,3	4,1	2,8	4,7	5,9	7,5	7,6	2.650 ⁽¹⁾	54-56
MAROUA	6,8	7,4	9,4	10,1	9,1	6,1	4,4	2,8	3,4	6,2	5,7	7,4	2.420	54-55-56
GAROUA	8,5	10,6	9,5	11,5	10,1	7,3	6,8	4,6	4,4	6,2	9,2	8,9	2.970 ⁽¹⁾	1956

(1) Sites particulièrement exposés au vent.

E V A P O R A T I O N

TABLEAU I (Suite 1)

Moyenne mensuelle journalière en mm

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Hauteur: totale: annuelle: mm	Années
KENIE	7,4	8,9	9,7	10,7	9,7	7,7	4,7	3,5	4,2	5,0	6,4	6,4	2.550	54-55
LAI	7,2	8,3	8,5	8,9	7,4	5,0	3,3	3,5	3,7	5,6	7	6,4	2.270	54-55- 56-57
DOUNFING	6,7	8,2	9,7	8,3	(7,5)	(7)	(4,5)	(3,5)	(4,2)	(5,0)	6,6	6,3	2.360 ⁽²⁾	55-56-57
FERKESSE- DOUGOU	5,5	7,3	7,5	7,2	(3,5)	(4,3)	3,1	2,9	2,8	3,4	5,1	5,4	1.770	57-58
TERO	(5,2)	(7,3)	(7,5)	(7)	3,6	4,3	3,1	2,7	3,0	4,1	4,8	5,2	1.760	1957
LHOTO	4,8	6,7	6,7	5,2	5,1	4	3,5	3,3	3,5	4,0	4,6	4,0	1.680	56-57
KANDALA	6,1	7,0	7,3	6,7								6,05		57-58
FOMI					5,6	4,8	3,2							1952
KINDIA	6,6	10,5	11,3	7,5	5,5	(3,7)	3,6	1,3	2,9	3,0	3,5	6,2	1.990	53-54
SOUAPITI	4,6	7,7	8,7	7,2	5,1	3,4	3	2	3,3	4,2	3,5	3,8	1.720	54-55-56
TIMBIS	4,5	5,7	6,3	5,3	(5,5)	(4,0)	(3,5)	(3,0)	2,9	3,5	3,8	4,2	1.590	57-58

(2) Le site du DOUNFING est nettement plus abrité que celui du KENIE.

une forte humidité permanente au niveau du sol. La station de SOUAPITI, au contraire, bien que située dans une vallée assez encaissée, est soumise à une saison sèche assez sévère et, pendant la saison des pluies, les éclaircies ne sont pas rares et l'ensoleillement non négligeable.

Dans ces deux cas, la question de l'influence de la situation du bac se trouve déjà posée : nous en parlerons plus loin. L'altitude joue également un rôle important : elle a tendance à augmenter légèrement l'évaporation par suite d'une pression atmosphérique plus faible, mais cette influence est largement dépassée par celle de l'abaissement de température qui intervient dans l'autre sens, de sorte que les stations d'"altitude" donnent toujours des résultats d'évaporation inférieurs à ceux des stations basses de la même région. Sur les hauts plateaux du FOUTA DJALLON, on trouve 1.590 mm à la station de MADINA TAKOSSERE (TIMBIS), soit un déficit de 150 à 200 mm sur des stations situées dans des régions analogues mais en basse altitude.

Encore ces stations représentent-elles des conditions d'évaporation correctes relatives à des espaces importants. Il n'en est plus de même lorsque la station est située dans un micro-climat particulier, c'est-à-dire à un emplacement tel que les conditions de température, de vent, d'humidité, y soient notablement différentes de celles que l'on pourrait observer en moyenne dans l'ensemble de la région que la station est censée représenter. La station de KINDIA (GUINEE FRANCAISE), par exemple, située dans un climat analogue à celui de la région de SOUAPITI, donne une évaporation de 1.990 mm, contre 1.770 mm à SOUAPITI. La pluviométrie plus forte de SOUAPITI ne suffit pas à expliquer la différence, mais le bac de KINDIA est situé sur une colline dénudée, balayée par des vents violents alors que le bac de SOUAPITI est installé dans la vallée du KONKOURE moins exposé. L'influence de ces micro-climats est d'autant plus importante que la région considérée est, en moyenne, plus aride. L'exemple le plus frappant nous est fourni par les deux bacs installés à BOL, en bordure du Lac TCHAD. Le premier de ces bacs a été enterré dans une dune de sable vif, à moins de 1 km du lac ; on a observé, en 1957, une évaporation de 3.560 mm. Le second est implanté dans une île, non loin du rivage : on a trouvé, en 1957, une évaporation de 2.560 mm. Ces chiffres montrent également qu'en zone aride, le micro-climat créé par un réservoir, ne s'étend guère au-delà des limites de ce réservoir. L'influence sur le voisinage est plus étendue dans les zones humides. Parmi les stations du Tableau I présentant quelques anomalies dues à une situation un peu différente des conditions moyennes de la région, nous citerons, en dehors de BOL :

- BOGO, au CAMEROUN : micro-climat sec,
- Le DOUNFING, au SOUDAN : site abrité,
- GAROUA, au CAMEROUN : station très exposée, placée sur une butte,
- IFOU, en COTE-d'IVOIRE : la cuve est installée sous un très léger couvert forestier. Une aire dégagée, plus proche des conditions d'une retenue, donnerait une évaporation plus élevée,
- BRAZZAVILLE, au MOYEN-CONGO : micro-climat sec par rapport aux bords du CONGO.

L'examen de ce tableau, compte tenu des écarts dus aux micro-climats, certains bacs étant situés dans le lit majeur de cours d'eau, d'autres sont situés en dehors de tout micro-climat humide (c'est généralement le cas des stations subdésertiques et sahéliennes), montre que l'évaporation annuelle décroît très rapidement des régions subdésertiques où elle serait de l'ordre de 3,80 m (sur bac enterré en dehors de tout micro-climat humide) aux régions tropicales où elle est de 2.200 à 2.500 mm en micro-climat humide et de 2.500 à 2.900 mm en micro-climat sec. Elle décroît plus lentement du climat tropical aux climats tropicaux de transition (1,600 à 1.800 mm) et aux climats équatoriaux (800 à 1.000 mm en micro-climat humide, 1.000 à 1.200 mm en micro-climat sec).

Nous avons tracé, sur la Fig. 1, les variations de l'évaporation moyenne journalière pour les différents mois de l'année, à quelques stations sélectionnées représentant les différents climats de l'AFRIQUE NOIRE (classification des hydrologues).

Les courbes relatives aux climats subdésertique, sahélien, tropical et tropical de transition, présentent un certain nombre de points communs. Le minimum d'Août, partout observé, correspond au centre de la saison pluvieuse. Le maximum d'Octobre ou Novembre correspond à un réhaussement de la température et une diminution de l'humidité marquant la fin de l'été boréal. Après un léger fléchissement durant l'hiver boréal, l'évaporation croît à nouveau avec la température et la sécheresse. L'accroissement est plus rapide dans le climat guinéen (tropical de transition) par suite de la diminution très rapide de l'hygrométrie et de l'augmentation également très rapide de la température diurne au printemps. Par suite de l'écart important entre les températures diurnes et nocturnes, on observe, la nuit, des phénomènes de condensation qui sont particulièrement importants en Avril. Le maximum d'évaporation est atteint en Mars pour ce climat ; dès les premières pluies d'Avril,

l'humidité relative augmente à nouveau sans que l'on observe, toutefois, un abaissement appréciable de la température : l'évaporation commence à décroître sérieusement.

Le maximum de saison sèche est atteint de plus en plus tardivement à mesure que l'on se déplace vers le Nord. On peut fixer approximativement, comme dates de maxima :

- Avril, pour le tropical
- Mai, pour le sahélien
- Fin Mai, début Juin, pour le subdésertique.

Pour ces deux derniers types de climats, c'est l'approche de la mousson, et non les précipitations qui n'ont pas encore commencé, qui commande la baisse de l'évaporation par une augmentation de l'humidité relative de l'air.

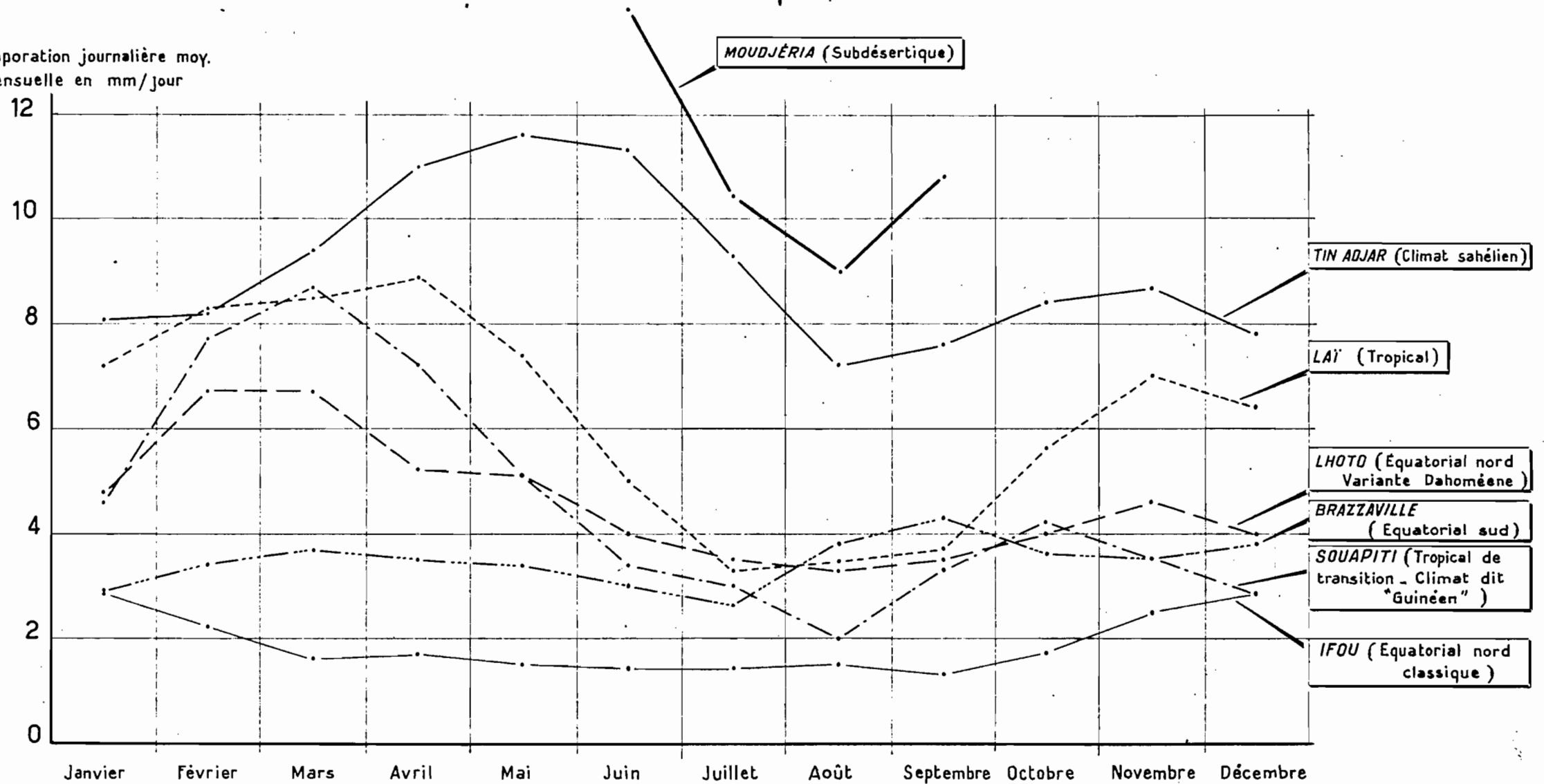
Le climat équatorial Nord classique est représenté, sur notre graphique, par la station de l'IFOU située en COTE-d'IVOIRE. L'évaporation varie relativement peu au cours de l'année ; elle augmente seulement de façon sensible pendant les quatre mois de la "grande saison sèche" au cours de laquelle l'humidité relative reste néanmoins élevée. La "petite saison sèche" est marquée par un très léger accroissement de l'évaporation, à vrai dire peu significatif, en Août.

En A.O.F., le climat équatorial admet une variante sèche au DAHOMEY, due à la situation géographique très particulière de ce territoire protégé de la mousson par la masse continentale de l'AFRIQUE OCCIDENTALE et les montagnes de GOLD COAST et du TOGO. Du fait de la sécheresse, le maximum de "grande saison sèche" est plus marqué et le total annuel est environ deux fois supérieur à celui des autres régions équatoriales de l'hémisphère Nord. Par contre, le maximum d'Août est inexistant.

Nous avons choisi, pour représenter le climat équatorial Sud, la station de BRAZZAVILLE, bien que celle-ci soit située dans une région notablement plus sèche que la moyenne des régions qu'elle est sensée représenter. Mais, en raison même de cette anomalie, les variations typiques de l'évaporation sous ce climat sont mieux marquées qu'à une station plus représentative telle que celle de SOUNDA dans la vallée du KOUILOU. La comparaison des courbes de BRAZZAVILLE et de l'IFOU est intéressante : sur le bassin de l'IFOU, la courbe est plate avec, cependant, un maximum net pendant la grande saison sèche (Décembre, Janvier). On retrouve bien ce maximum de saison sèche à BRAZZAVILLE (Août, Septembre). Mais, le bac de BRAZZAVILLE

Variations de l'évaporation journalière moyenne mensuelle sur bac au cours de l'année pour différents types de climats d'Afrique noire

Évaporation journalière moy.
mensuelle en mm/jour



Il reste à savoir quels résultats on peut tirer d'un bac enterré en vue de l'application à une grande retenue. En effet, le fait de créer la retenue modifie le climat dans un périmètre plus ou moins important et d'autant plus limité, nous l'avons vu, que la zone étudiée est plus aride. Reprenons l'exemple du Lac TCHAD. Le bac enterré dans la dune de sable vif et soustrait pratiquement au micro-climat, donne une évaporation moyenne annuelle de 3.460 mm. Le rapport avec l'évaporation de la retenue serait donc égal à 0,66. Il s'agit probablement d'une limite inférieure. Plus on se rapproche des climats humides, plus ce rapport ira croissant.

L'étude des mares du KENIE nous fournit un second point de repère : le bac flottant donne environ 95 % de l'évaporation au bac enterré. Il s'ensuit que, si l'on adopte le même rapport entre grande retenue et bac flottant que pour le Lac TCHAD, on obtient, pour le bac enterré, un coefficient de réduction voisin de 0,85.

En conclusion, nous proposons d'adopter comme rapport :

$$\frac{\text{Evaporation sur bac enterré}}{\text{Evaporation sur grande retenue}}$$

les chiffres suivants que nous considérons comme "prudents" :

- climat subdésertique	0,65 à 0,70
- climat sahélien	0,70 à 0,80
- climat tropical	0,75 à 0,85
- climat tropical de transition	0,85 à 0,90
- climat équatorial	0,90 à 0,95

Il est bien entendu que les bacs enterrés de référence sont supposés installés en dehors de tout micro-climat humide, sinon tous ces rapports seraient à majorer.

4°) Rapports entre les résultats de l'évaporomètre PICHE et du bac évaporatoire :

Ce rapport est assez variable ; de façon générale, il croît avec l'humidité relative : compris entre 0,6 et 0,85 en saison sèche dans les régions subdésertique, sahélienne et tropicale. Il devient supérieur à 1 en saison des pluies, sauf, parfois, en régime subdésertique, et peut, dans certains cas, atteindre et dépasser 2. Il est d'ailleurs variable de façon systématique suivant les conditions d'installation du bac, le type ou l'orientation de l'abri météorologique.

II - DEFICIT d'ECOULEMENT et EVAPOTRANSPIRATION

A - PRINCIPE et MODE de CALCUL -

Lorsqu'il est tombé sur un bassin un volume de précipitations V_p en un temps T , pendant la même période, une partie de l'eau précipitée s'est écoulee (V_Q), une partie s'est évaporée ou a été transpirée par les végétaux (V_E), une partie est définitivement perdue par infiltrations profondes (V_I) et le reste s'est infiltré pour aller alimenter les nappes ou s'est emmagasiné dans le lit de la rivière et de ses affluents en attendant d'être restitué à l'exutoire (V_N).

Il existe d'autres destinations pour l'eau de pluie, par exemple le remplissage des cavités naturelles imperméables dont le stock s'évapore, en partie, par la suite. Mais ces cas particuliers peuvent être assimilés à l'une ou l'autre des éventualités déjà citées. D'autre part, on néglige, en général, les pertes V_I plus rares, ainsi que les pertes par inféoflux dans le lit même de la rivière, au droit de la station. Dans ces conditions, l'équation du bilan peut s'écrire :

$$V_P = V_Q + V_E + V_N$$

Le terme V_N peut être positif ou négatif suivant que la période de durée T voit un renforcement ou une vidange des réserves du bassin. Il est nul si l'état des nappes et le stock des lits sont les mêmes au début et à la fin de la période ; c'est à peu près ce qui se passe lorsqu'on envisage un cycle hydrologique annuel allant de l'étiage d'une année donnée à celui de l'année suivante. Plus exactement, dans ce dernier cas, la différence entre les volumes d'eau mis en réserve est négligeable devant le volume écoulé à la station. Le déficit d'écoulement est alors égal à l'évapotranspiration $V_E = V_p - V_Q$. La condition $\frac{V_N}{V_Q} \neq 0$ est encore mieux réalisée si l'on considère une période de plusieurs années.

Le calcul du déficit d'écoulement se fait en évaluant séparément V_Q et V_p . V_Q est déterminé par la mesure des débits journaliers à la station limitant le bassin. V_p se calcule en planimétrant le réseau d'isohyètes sur le bassin pour l'année ou la période étudiée.

Un certain nombre d'auteurs ont introduit la notion d'"Evapotranspiration potentielle" définie comme l'évaporation que l'on obtiendrait si le sol était constamment saturé. Cette notion, utile en agronomie, offre

moins d'intérêt en hydrologie, car elle s'éloigne notablement, en général, de l'évapotranspiration effective. Ce n'est que dans le cas des régimes équatoriaux et de certains régimes tropicaux de transition que les deux notions se rejoignent. Dans ces zones très pluvieuses, les "saisons sèches" se traduisent par un simple fléchissement de la pluviométrie sans arrêt total des précipitations.

Notons enfin que l'on préfère introduire dans les calculs, au lieu des volumes d'eau mis en jeu, les hauteurs ou lames d'eau équivalentes plus faciles à manipuler.

B - RESULTATS OBTENUS en AFRIQUE NOIRE -

Nous avons réuni dans les tableaux II et II ter les résultats obtenus pour un certain nombre de bassins d'AFRIQUE NOIRE dont les régimes hydrologiques s'étendent du tropical pur à l'équatorial.

En régime sahélien et subdésertique, le déficit d'écoulement relatif à un bassin d'une certaine étendue est pratiquement égal à la pluviométrie. Par ailleurs, le coefficient d'écoulement varie dans des proportions considérables, de 10 % à 0, suivant le point où l'on place, sur le cours d'eau, l'exutoire du bassin. Si le relief est accentué et le terrain relativement imperméable (massifs sahariens), on peut observer un coefficient d'écoulement assez élevé dans la partie supérieure des oueds ; plus à l'aval, dès que commence la dégradation systématique du réseau hydrographique, l'endoréisme devient la règle et le coefficient d'écoulement est pratiquement nul. De toute façon, la notion de déficit d'écoulement n'est plus d'aucun secours à l'hydrologue pour ces régimes.

A l'autre extrémité de la "gamme des régimes", nous trouvons le régime équatorial. Le climat correspondant admet des variantes sèches ; l'exemple classique, le plus significatif, est celui des régimes du Sud-DAHOMÉY. Il peut en exister d'autres, plus sporadiques et généralement limités à de très petits bassins sous l'influence de micro-climats (MOYEN-CONGO). Dans la plupart des cas, les régimes équatoriaux relèvent d'un climat humide et les saisons dites "sèches" ne sont marquées, en réalité, que par un fléchissement de la pluviométrie. Il en résulte que ces bassins ont la possibilité d'évaporer pratiquement toute l'année. On constate que, dans ce cas, le déficit d'écoulement tend vers l'évaporation moyenne sur nappe d'eau libre et peut même la dépasser si le bassin est entièrement couvert de forêts.

Nous indiquerons, comme chiffres repères, le déficit du KOUILOU à SOUNDA : 925 mm, égal à l'évaporation mesurée sur bac à SOUNDA. Le bassin de l'OGOUE à la station de LAMBARENE, accuse un déficit moyen de 1.025 mm, certainement supérieur à l'évaporation sur nappe d'eau libre, ce bassin étant entièrement recouvert de forêts.

Sur les cartes n° 3 et n° 4, nous avons tracé les courbes d'égal déficit d'écoulement pour l'AFRIQUE OCCIDENTALE FRANCAISE et l'AFRIQUE EQUATORIALE FRANCAISE.

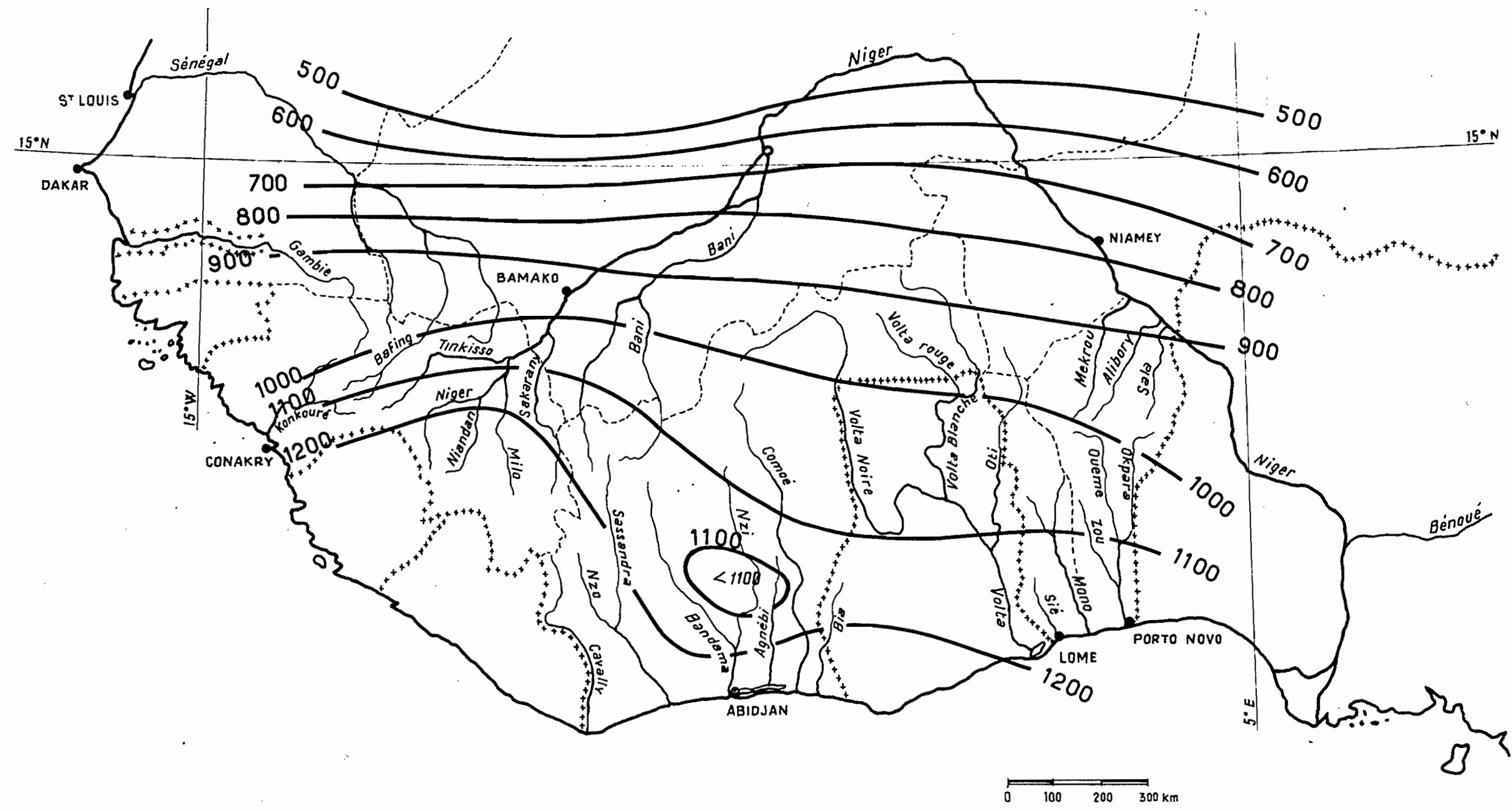
On constate que le déficit d'écoulement, en fait l'évapotranspiration effective, suit grosso modo, en éliminant les particularités locales et l'influence orographique, des variations qui, de la zone tropicale de transition à la zone désertique, sont inverses de celles de l'évaporation sur nappe d'eau libre. Ce fait, qui semble paradoxal à première vue, est dû à ce que, par la décroissance de la pluviométrie, la quantité d'eau disponible, matière première de l'évapotranspiration, décroît à mesure qu'augmente le pouvoir évaporateur de l'air.

Cependant, le déficit d'écoulement ne croît pas uniformément du Nord au Sud. Il passe, en réalité, par un maximum correspondant sensiblement au régime tropical de transition type. Ceci tient à une pluviométrie abondante souvent supérieure à celle des climats équatoriaux humides (bandes côtières exceptées) constituant des réserves qui sont évaporées durant la saison sèche : voir la courbe d'évaporation sur bac relative à SOUAPITI (graphique 1).

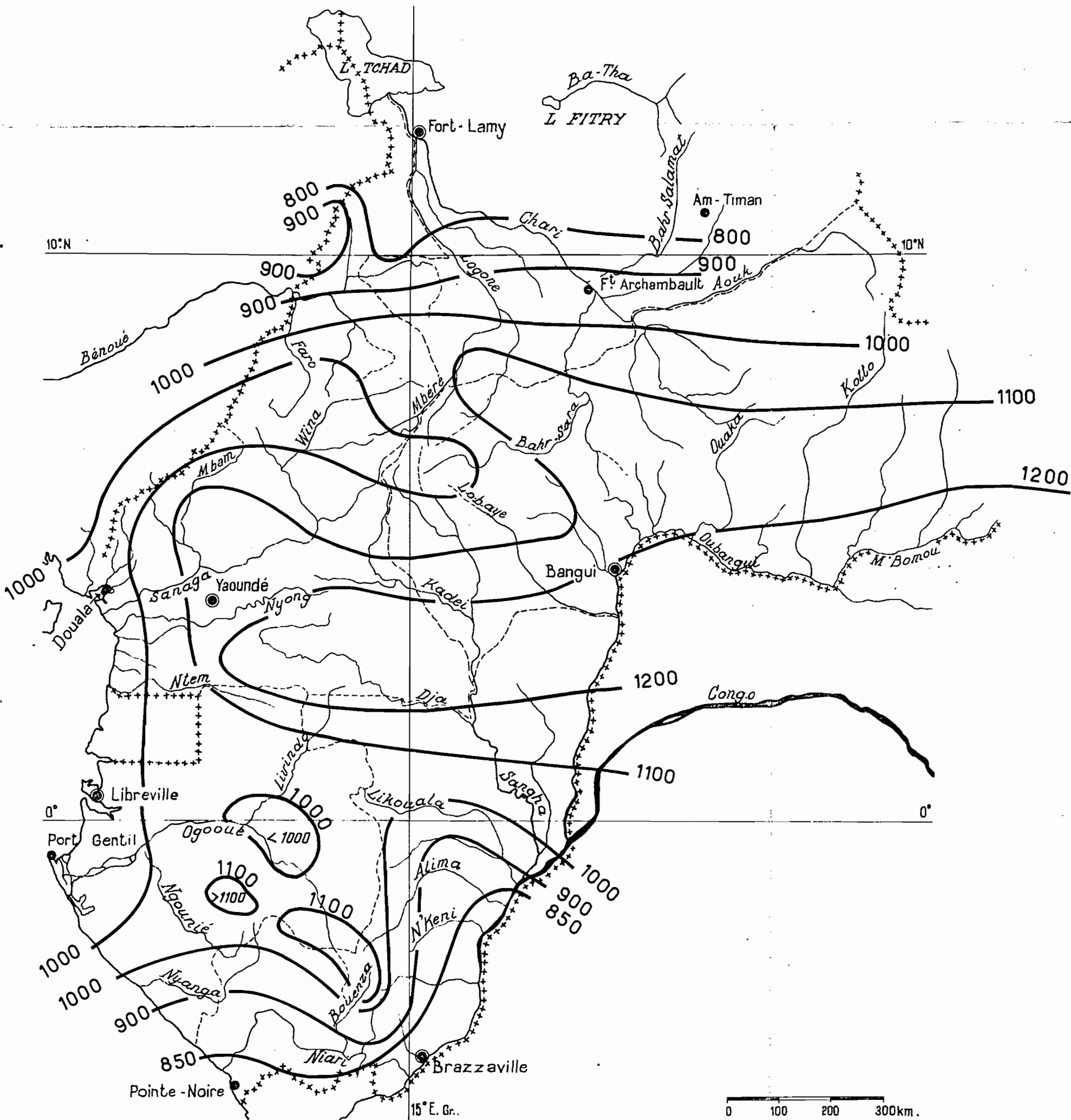
En AFRIQUE NOIRE FRANCAISE, on peut estimer qu'un déficit moyen interannuel de 1.300 mm constitue une limite supérieure. Cette valeur n'est approchée que sur quelques bassins soumis au régime tropical de transition. La "ligne des maxima" est visible en A.E.F. sur la carte n° 4. En A.O.F., le régime équatorial se manifeste trop près de la bande côtière pour que le phénomène puisse être mis en évidence.

Tandis que l'évaporation obéit de très près aux facteurs conditionnels d'ordre climatique, le déficit d'écoulement est fortement influencé par les conditions topographiques et géologiques. Une pente accentuée en terrain imperméable favorise le ruissellement et conduit à des déficits faibles : c'est le cas des régimes de montagnes indiqués sur les tableaux. Par contre, les faibles pentes, les zones inondables augmentent notablement les déficits par rapport aux bassins présentant un relief moyen : de 10 à 15 % en régime tropical ou tropical de transition. Si le bassin est très perméable, une importante partie des précipitations est rapidement mise à l'abri de l'évaporation.

Carte provisoire des déficits d'écoulement en A.O.F.



Carte provisoire des déficits d'écoulement en A.E.F.



L'exemple le plus frappant nous est fourni en AFRIQUE EQUATORIALE FRANÇAISE par les cours d'eau des Plateaux BATEKES (couche de sables roux pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur).

Les courbes tracées sur les cartes 3 et 4 font abstraction des particularités locales et se rapportent à des bassins moyens de l'ordre de 10.000 km² dont le relief et la géologie représentent à peu près les conditions moyennes de la région géographique considérée. L'influence orographique est particulièrement sensible au CAMEROUN sur le massif de l'AD/MAOUA (LOM, WINA, M'BERE).

Il résulte des remarques précédentes que, si l'évapotranspiration réelle est relativement plus facile à calculer, par la méthode du bilan hydrologique, que l'évaporation sur retenu, il est, par contre, beaucoup plus difficile de l'exprimer par des formules à partir de ses facteurs climatiques, topographiques et géologiques.

DEFICIT d'ECOULEMENT en AFRIQUE NOIRE FRANCAISE

TABLEAU II
Régime Tropical

Bassin et station	Surface du bassin versant km ²	Pluvio- métric moyenne mm	Déficit mm	Observations
<u>A.O.F.</u>				
NIGER à MOPTI	281.600	1.310	1.184 ⁽¹⁾	mixte (tropical de transition)
BANI à DOUNA	102.600	1.275	1.030	
ALIBORI à la Route de KANDI	8.150	1.140	973	
FALEME à KIDIRÁ	28.180	1.175	964	mixte (tropical de transition)
SENEGAL à GALOUGO	108.000	1.150	960	mixte (tropical de transition)
SENEGAL à BAKEL	232.700	950	842	mixte (subdésertique)
<u>A.E.F. CAMEROUN</u>				
CHARI à FORT-ARCHAMBAULT	193.000	1.070	1.018	mixte (tropical de transition)
BENOUE à RIAO	31.000	1.285	1.000	
TANDJILE à BOLOGO	3.950	1.070	985 ⁽¹⁾	
BENOUE à GAROUA	64.000	1.130	944	
CHARI à FORT-LAMY	600.000	1.000	935 ⁽¹⁾	mixte (tropical de transition)
MAYO-KEBI à COSSI	26.000	925	815	

(1) Déficits anormalement élevés dus à des zones d'inondation

DEFICIT d'ECOULEMENT en AFRIQUE NOIRE FRANCAISE

TABLEAU II bis

Régime Tropical de Transition

Bassin et station	Surface du bassin versant km ²	Pluvio- métrique moyenne mm	Déficit mm	Observations
<u>A.O.F.</u>				
KONKOURE au PONT	10.250	2.060	1.010	Régime de montagne
COMOE à ANIASSUE	66.500	1.190	1.085	Bassin très allongé
N'ZI à ZIENOA	34.000	1.200	1.129	Mixte (équatorial de transition)
BANDAMA à BRIMBO	59.500	1.320	1.155	Mixte (équatorial de transition)
NIANDAN à BARO	12.600	1.875	1.193	
NIGER à KOULIKORO	120.000	1.600	1.195	Mixte (tropical pur)
NIGER à KOUROUSSA	18.000	1.690	1.230	
<u>A.E.F. CAMEROUN</u>				
LOM à BETARE-OYA	10.680	1.480	980	Régime de montagne
WOURI à YABASSI	8.250	2.150	1.020	Régime de montagne
M'BERE à M'BERE	7.100	1.550	1.080	Régime de montagne
FARO à SAFAIE	25.400	1.545	1.069	Mixte (tropical pur) et régime de montagne
LOGONE à MOUNDOU	34.900	1.460	1.085	Mixte (tropical pur)
LOGONE à BONGOR	73.700	1.345	1.100 ⁽¹⁾	
M'BALI à M'BALI	4.905	1.500	1.100	
SANAGA à EDEA	135.000	1.630	1.120	Mixte (équatorial de transition)
LOGONE à LAI	60.320	1.420	1.134	Mixte (tropical pur)

(1) Déficits anormalement élevés dus à des zones d'inondation

DEFICIT d'ECOULEMENT en AFRIQUE NOIRE FRANCAISE

TABLEAU II ter

Régime Equatorial de Transition

Bassin et station	Surface du bassin versant km ²	Pluvio-métrie moyenne mm	Déficit mm	Observations
<u>A.O.F.</u>				
BIA à AYAME	9.320	1.475	1.215	
<u>A.E.F. CAMEROUN</u>				
FOULAKARY à KIMPANZOU	2.813	1.460	830	
DJOUE à KIBOSSA	5.450	1.630	905	Partiellement, Plateaux Batékés
KOUILOU à SOUNDA	55.000	1.510	925	
LOKOUNDJE à LOLODORF	1.177	1.860	1.110	
BOUENZA à MOUKOUKOULOU	5.800	1.720	1.115	
LOBAYE à M'BATA	30.000	1.520	1.180	Mixte (tropical de transition)
NYONG à M'BALMAYO	14.300	1.460	1.195	
<u>Régime Equatorial pur</u>				
<u>A.E.F. CAMEROUN</u>				
N'KENI à GAMBOMA	6.250	1.850	850	Plateaux Batékés
ALIMA à TCHIKAPIKA	20.350	1.840	935	Plateaux Batékés
OGOUE à LAMBARENE	216.000	1.790	1.025	
LIKOUALA-MOSSAKA à ETOUMBI	9.000	1.600	1.045	
N'TEM au Bac de N'GOAZIK	18.060	1.770	1.280	Bassin très allongé

A N N E X E

LISTE NON LIMITATIVE des STATIONS d'EVAPORATION
d'AFRIQUE NOIRE FRANCAISE

AFRIQUE OCCIDENTALE FRANCAISE (A.O.F.)

STATIONS NORMALISEES

<u>Territoire</u>	<u>Station</u>
- Mauritanie	MOUDJERIA
- Soudan	TIN ADJAR KOUMBAKA
- Guinée	KANKAN TIMBIS (Hts-Plateaux du FOUTA) BOULA (HAUT-MILO)
- Côte-d'Ivoire	FERKESSEDOUGOU MAN IFOU
- Haute-Volta	GAGARA
- Niger	ALOKOTO (bassin de la MAGGIA)

AUTRES STATIONS

- FELOU : Bac installé au site du FELOU, sur le SENEGAL, lors de l'étude de son aménagement hydro-électrique ; les observations portent sur trois mois de l'année 1952.
- KENIE : Station située dans la vallée du NIGER entre BAMAKO et KOULIKORO. Les seules observations que nous ayons obtenues se rapportent aux années 1954 et 1955.
- DOUNFING : Station installée lors des études hydrologiques sur le bassin expérimental du DOUNFING, près de BAMAKO. Les observations ont été suivies en 1955 et 1956.

- MAROUA : Station du Nord-Cameroun, située sur la TSANAGA à l'amont de BOGO. Les observations ont été suivies avec soin depuis 1954 à Mai 1956.
- LAI : La station est située dans la vallée du LOGONE (TCHAD). Les observations ont été suivies depuis 1954.
- GAROUA : Le bac est installé sur une butte, un peu en dehors de la vallée de la BENOUE. Les observations sont suivies depuis 1956 (CAMEROUN).
- BANGUI : Bac exploité de façon sporadique. Nous avons retenu les observations de 1954 (OUBANGUI).
- YAOUNDE : Bac installé en 1954 (CAMEROUN).
- SOUNDA : Cette station a été installée par le Service Hydrologique du MOYEN-CONGO pour le compte de la Mission E.D.F. chargée de l'étude de l'aménagement du KOUILOU. Les observations, commencées en Avril 1956, se poursuivent régulièrement depuis cette date.
- BRAZZAVILLE : Bac installé à l'Institut d'Etudes Centres-Africaines, assez loin du CONGO, il est observé depuis Janvier 1956.