

TROISIEMES JOURNEES DE L'HYDRAULIQUE

---

ETUDE DE L'EVAPORATION SUR LES SURFACES  
D'EAU LIBRES EN AFRIQUE NOIRE FRANCAISE

par

M. J. RODIER  
Ingénieur en Chef au Service  
des Etudes d'Outre-Mer d'E.D.F.  
Chargé de la Direction des  
Etudes Hydrologiques  
de l'O.R.S.T.O.M.

et

M. P. TOUCHEBEUF de LUSSIGNY  
Ingénieur au Service des  
Etudes d'Outre-Mer  
d'E.D.F.

Décembre 1953

TROISIEMES JOURNEES DE L'HYDRAULIQUE



ETUDE DE L'EVAPORATION SUR LES SURFACES  
D'EAU LIBRES EN AFRIQUE NOIRE FRANCAISE

par

M. J. RODIER  
Ingénieur en Chef au Service  
des Etudes d'Outre-Mer d'E.D.F.  
Chargé de la direction des  
Etudes Hydrologiques  
de l'O.R.S.O.N.

M. P. TOUCHEBEUF de LUSSIGNY  
Ingénieur au Service des  
Etudes d'Outre-Mer  
d'E.D.F.

L'évaporation est un facteur essentiel du bilan hydrologique : dans le cas d'un bassin à sous-sol imperméable, la totalité des pertes entre précipitations et écoulement est due directement ou indirectement à l'évaporation.

L'évaporation agit, en effet, non seulement sur l'eau de ruissellement, mais encore d'une façon indirecte sur la fraction des précipitations infiltrée au moment des averses. En effet, nappes superficielles ou nappes profondes alimentent les cours d'eau ; leurs apports sont alors soumis à l'évaporation directe, après déduction des pertes par remontées capillaires ou absorption par les végétaux. Ces dernières pertes correspondent encore aux effets de l'évaporation.

Les pertes définitives par infiltration sont dues uniquement à l'alimentation de nappes s'écoulant vers d'autres bassins versants ou à la disparition dans des régions perméables en grand avec également alimentation d'un bassin différent. Ces cas particuliers sont assez peu fréquents en Afrique Noire.

L'évaporation intervient aux différents stades du cycle de l'eau de la façon suivante :

- 1° - évaporation sur les feuilles des végétaux et absorption par les végétaux au moment des averses avec évaporation ultérieure,
- 2° - évaporation à la surface du sol au moment du ruissellement,
- 3° - évaporation à la surface des cours d'eau,
- 4° - pertes des nappes par remontées capillaires ou par l'intermédiaire des végétaux, en cours de tarissement.

Le bilan hydrologique et, plus précisément, le calcul du déficit d'écoulement donnent une première indication sur l'ordre de grandeur des pertes par évaporation. Mais il est très difficile d'évaluer par des méthodes directes les pertes par évaporation dans le cas le plus général. Seul le cas des nappes d'eau libres ne présente pas de très graves difficultés. C'est le premier stade d'une étude générale d'évaporation. La connaissance des pertes dans ce cas relativement simple constitue en quelque sorte une indication permettant des estimations sommaires dans le cas le plus général.

Par ailleurs, les études d'évaporation sur les nappes d'eau libres sont essentielles pour l'examen des conditions d'exploitation des grands réservoirs. Depuis quelques années, il a été nécessaire, pour la mise en valeur de l'Afrique Noire Française, de rechercher des réservoirs de toutes dimensions destinés soit à l'amélioration de la navigation, soit à la production d'énergie hydro-électrique, soit aux besoins de l'Agriculture. Plus généralement d'ailleurs ces réservoirs ont été envisagés pour plusieurs fins.

Nous citerons parmi les plus grands :

- le réservoir de GOUINA sur le SENEGAL
  - les réservoirs du KONKOURE en GUINEE
  - le réservoir de FOMI sur le NIANDAN (une des branches supérieures du NIGER)
  - le réservoir de LAGDO sur la HAUTE-BENOUE au CAMEROUN
- etc....

Or, les données expérimentales directes sont très rares. Nous citerons une série de mesures effectuées sur le lac de GUIERS et des mesures fragmentaires effectuées à l'Office du NIGER.

Les données américaines provenant d'études expérimentales assez poussées sont souvent utilisées. Malheureusement, les conditions climatologiques sont très différentes dans les régions soudanaises, de sorte que l'emploi de ces données risque de conduire à de graves erreurs. Des mesures directes s'imposaient donc. C'est pourquoi des études ont été entreprises pour le compte de la Direction Générale des Travaux Publics de l'A.O.F. (Service de l'Hydraulique) ou de sociétés d'économie mixte productrices d'énergie électrique. Elles ont été effectuées soit par l'U.H.E.A. (pour GOUINA), soit par Electricité de France (pour l'aménagement du réservoir du NIANDAN et les réservoirs du KONKOURE);

Nous rendons compte dans le présent rapport des études d'Electricité de France. Ces études avaient essentiellement pour objet la détermination des pertes par évaporation à la surface de réservoirs. Elles sont actuellement reprises par l'Office de la Recherche Scientifique Outre-Mer qui compte leur donner une grande extension puisqu'elles couvriront, à bref délai, toute l'Afrique Noire Française par un réseau de sept stations. Les études effectuées ne seront plus orientées vers un but particulier comme celles de l'E.D.F., elles seront considérées comme un premier stade dans l'étude générale de l'évaporation.

Plusieurs années seront nécessaires pour aboutir à des résultats définitifs. Les méthodes employées présentent de nombreuses imperfections ; de nombreux tâtonnements ont été nécessaires. Il ne s'agit pas de recherches scientifiques parfaitement organisées mais de mesures faites par des ingénieurs (ces ingénieurs ayant par ailleurs à assurer l'exécution d'un programme très chargé), en vue d'obtenir quelques données expérimentales pour les guider dans leurs estimations. Les résultats sont incomplets. Des extrapolations, peut-être hasardeuses, ont dû être effectuées pour la détermination des principales données.

Toutefois, étant donné le manque de renseignements valables pour cette partie du globe, nous avons cru utile d'exposer, dès à présent, les résultats provisoires obtenus au cours des premières années d'études. D'autre part, en exposant les difficultés rencontrées et les moyens employés pour les résoudre, nous espérons faciliter la tâche des chercheurs qui auraient à entreprendre des études du même genre.

CONSIDERATIONS GENERALES SUR L'EVAPORATION SUR DES SURFACES  
D'EAU LIBRES -

Rappelons rapidement les différents facteurs qui interviennent dans le phénomène d'évaporation à la surface d'eau libre :

1°) le déficit hygrométrique ( $F - f$ ) où  $F$  désigne la tension de vapeur saturante correspondant à la température superficielle de l'eau et  $f$  la tension de vapeur de l'air ambiant au voisinage du plan d'eau ;

2°) la vitesse du vent au sol.

Il faut noter, en outre, un certain nombre de facteurs secondaires tels que :

- la pression atmosphérique
- les conditions dans lesquelles la vapeur d'eau émise par la surface liquide se disperse dans l'atmosphère environnante,
- l'existence et la densité de la végétation à la surface du plan d'eau.

Le vent peut intervenir soit par sa vitesse, soit par les conditions de l'écoulement de l'air : régime laminaire ou régime turbulent.

Par ailleurs, le déficit hygrométrique englobe lui-même un certain nombre de facteurs : la température superficielle de l'eau est fonction, non seulement de la température de l'air et du degré d'insolation, mais encore de la profondeur de la retenue et de la plus ou moins grande rapidité de renouvellement de cette retenue.

De nombreuses formules empiriques ont été mises au point pour tenir compte des facteurs les plus importants. Toutes dérivent de la formule de DALTON :

$$e = K ( F - f )$$

- $e$  : évaporation journalière  
 $K$  : coefficient qui tient compte des facteurs autres que le déficit hygrométrique, en particulier de la vitesse du vent  $V$ . Il peut être considéré comme à peu près constant pour un site donné si le vent est faible et particulièrement régulier.

Les facteurs  $F$ ,  $f$  et  $V$  sont loin d'être constants au cours d'une même journée dans les régions tropicales :

ils varient même dans de très fortes proportions.

Prenons un exemple : une journée de décembre en Haute-Guinée.

Au levé du jour, soit à 6 h 30, la température est très fraîche, admettons  $12^{\circ}$ ; le fleuve peut être recouvert de brouillard ; il peut y avoir un peu de rosée; le vent est nul. Vers 7 h 30 - 8 h, la température commence à monter en flèche, le degré hygrométrique diminue; le brouillard disparaît et la rosée commence à sécher. Vers midi, la température est déjà aux environs d'une trentaine de degrés ; une brise assez légère s'élève sur le fleuve, changeant les conditions d'évaporation. Vers 15 h, la température atteint son maximum :  $33$  à  $36^{\circ}$ ; elle reste étale jusque vers 16 h 30; puis, elle redescend lentement pour atteindre  $25^{\circ}$  à 18 h 30, à la tombée du jour. A ce moment, il est fréquent que la brise ait disparu. Ajoutons que, pour compliquer le problème, la brise ne s'étend pas sur les rives où, d'ailleurs, des herbes sèches de 1,50 m de hauteur l'arrêtent. Pendant la nuit, la température redescend lentement alors que le degré hygrométrique, qui était déjà de 70 % à 18 h passe à 90 % à 6 h du matin.

Le graphique n° 1 montre les variations de la température et de la tension de vapeur le 15 Mai 1952 à KANKAN (Haute-Guinée). Le graphique n° 2 montre comment varie l'évaporation horaire le 24 Mai 1953 à KINDIA pour des conditions climatologiques assez peu différentes de celles de KANKAN à cette période de l'année.

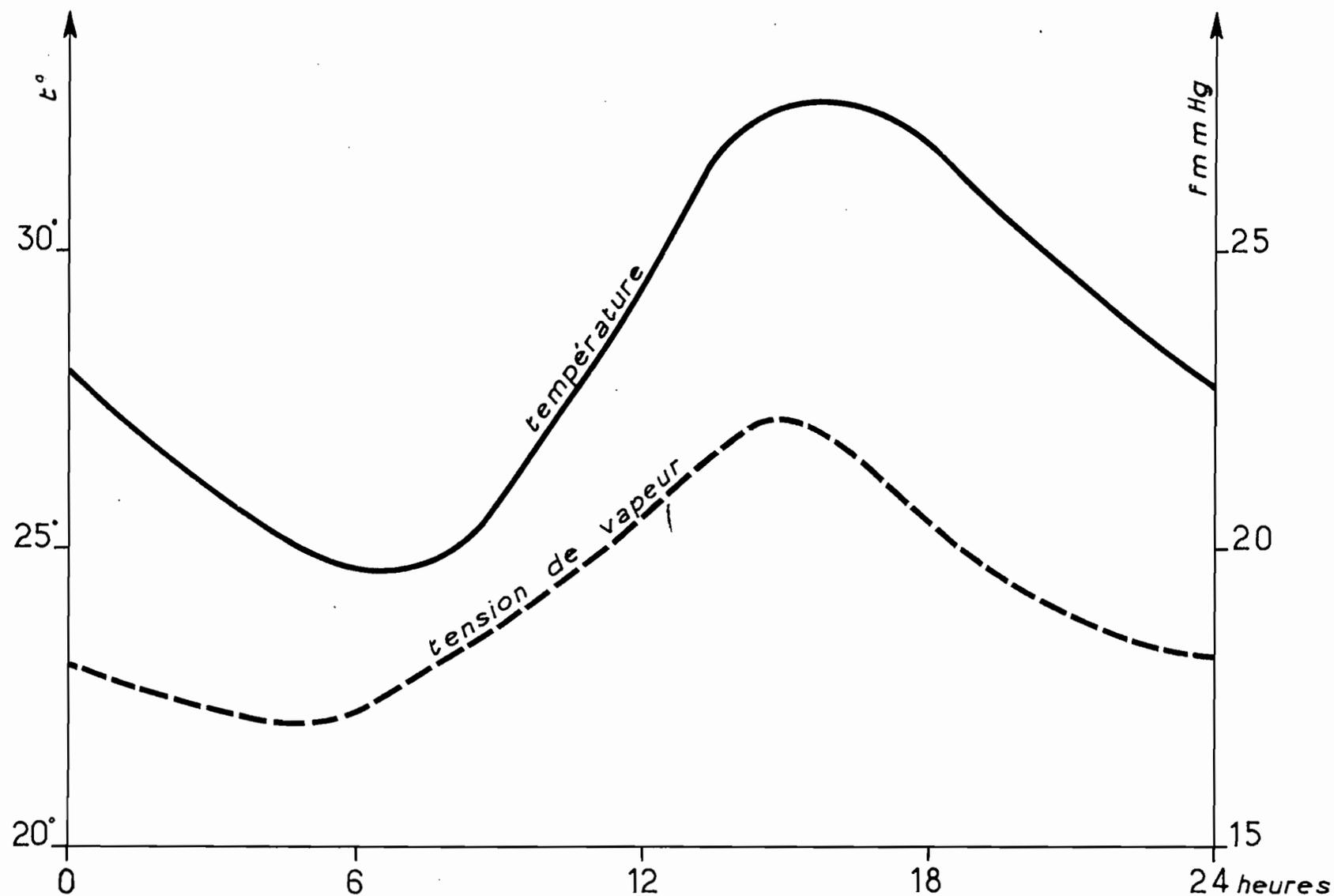
Il est difficile de découper la journée en tranches horaires pendant lesquelles les différents facteurs resteraient constants. Il est indispensable de procéder alors à des simplifications.

Suivant la façon dont sont prises en compte les variations journalières des températures intervenant dans le calcul de  $(F - f)$ , le coefficient K de la formule de DALTON peut varier dans de notables proportions.

Nous voyons donc que l'étude d'un site donné devra comporter, outre les relevés des hauteurs d'eau évaporées journellement, les relevés de températures sèche et humide de l'air au voisinage de la retenue, la température superficielle de l'eau, la vitesse du vent au sol, la pression atmosphérique. Enfin, il est très utile de relever l'évaporation à l'appareil PICHE pour lequel on possède des relevés portant sur de longues périodes à de nombreuses stations et d'établir des courbes de variations journalières de ces données.

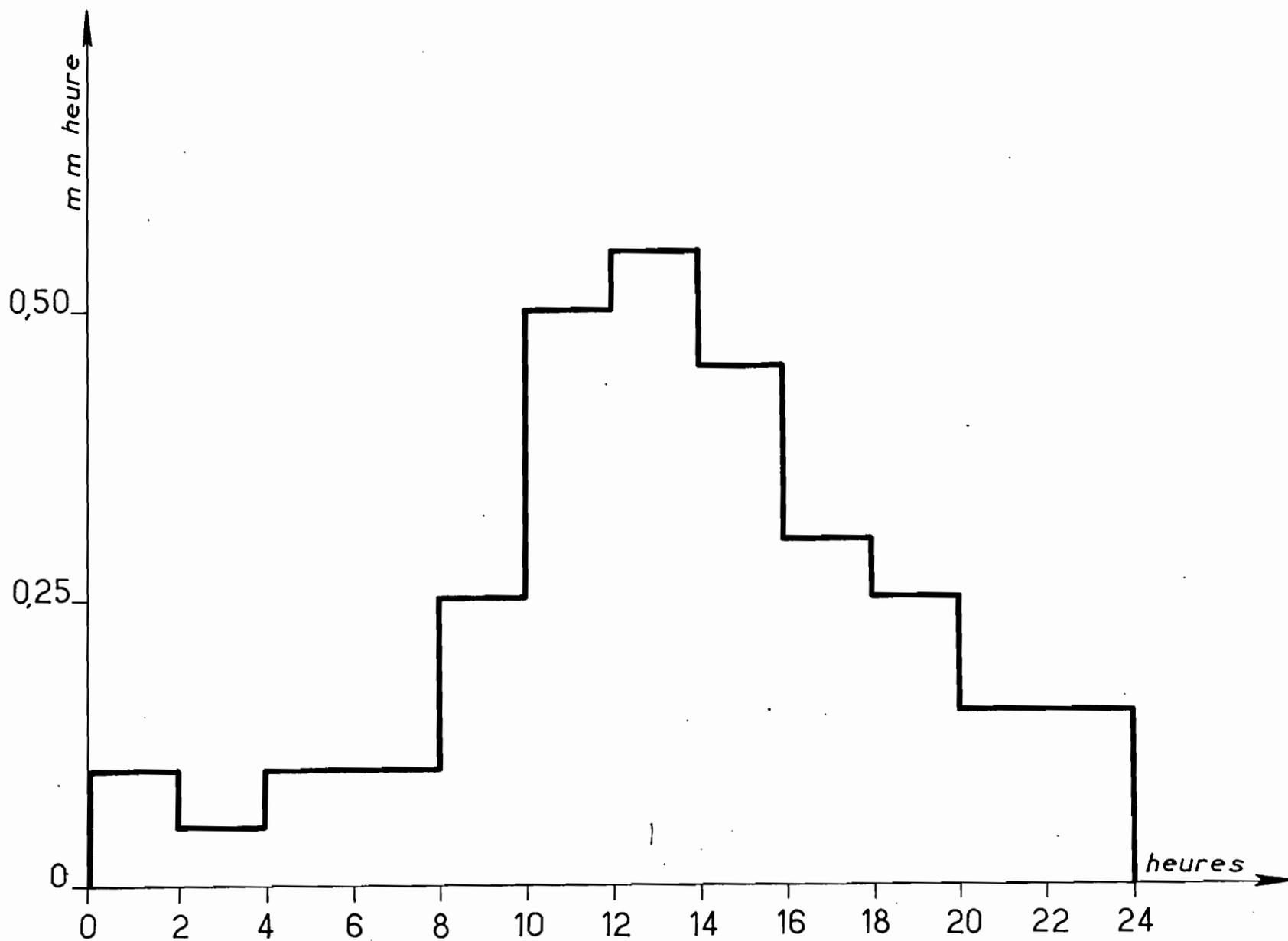
# VARIATIONS JOURNALIÈRES DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'HUMIDITÉ ABSOLUE

- KANKAN - 15 MAI 1952 -



- VARIATIONS JOURNALIÈRES DE L'ÉVAPORATION -

- KINDIA (GUINÉE) 24 MAI 1953 -



## PRINCIPE DES RECHERCHES -

Des études préliminaires effectuées en 1949 avaient déjà montré que la dispersion serait assez grande. D'autre part, il était impossible, étant donné les délais imposés pour les études, de procéder à des recherches portant sur une longue période et sur un grand nombre de points. Par conséquent, on a surtout cherché à établir des lois empiriques simples valables pour la région soudanienne, en général et permettant de relier les résultats obtenus aux données climatologiques fournies par des stations météorologiques exploitées depuis plusieurs années. Aussi, les études ont porté non seulement sur les emplacements de retenue envisagés, mais encore sur d'autres sites pour lesquels les dispositions naturelles ou la présence d'hydrologues rendaient faciles les observations.

Autant que possible, les postes d'observations étaient situés dans le lit apparent de grands fleuves dont le micro-climat se rapprochait sensiblement de celui d'une retenue de grande surface. Les conditions climatologiques au voisinage des points d'eau sont en effet très différentes en région soudanienne de celles des régions environnantes, généralement homogènes.

Les études avaient donc pour objet :

1°) de déterminer pour un certain nombre de sites les valeurs moyennes de l'évaporation journalière au moyen de bacs évaporatoires du type Colorado (ces mesures n'étaient effectuées que pendant des périodes de durée assez limitée);

2°) de rattacher ces mesures par des formules empiriques simples aux données climatologiques existant au voisinage immédiat des bacs standard et aux données de la station météorologique la plus proche, en particulier au déficit hygrométrique et à l'évaporation telle qu'elle est mesurée à l'appareil PICHE. Par ce procédé nous pensions pouvoir extrapoler les résultats des mesures, dans le temps et dans l'espace, c'est-à-dire calculer l'évaporation annuelle à partir de quelques mois d'observations directes puis la moyenne interannuelle et déterminer la hauteur d'eau annuelle évaporée dans un bac flottant à une station quelconque soudanienne.

3°) de donner des indications sur les relations entre l'évaporation mesurée dans les bacs standard enterrés ou flottants et sur des retenues de grande surface et de grande profondeur.

PRATIQUE DES MESURES -

Des mesures ont été effectuées aux sites suivants :

- 1°- au voisinage de la centrale du FELOU au SENEGAL,
- 2°- dans un bras mort du NIGER, aux rapides de KENIE, à 30 km environ à l'aval de BAMAKO au SOUDAN,
- 3°- au site du barrage éventuel de FOMI sur le NIANDAN, à 20 km au Sud-Ouest de KOUROUSSA en GUINEE,
- 4°- à KINDIA, au voisinage immédiat du FOUTA-DJALLON,
- 5°- aux différents sites de barrage sur le cours du KONKOURE. Les deux dernières séries de mesures ont été effectuées par la Mission KONKOURE (GUINEE.)
- 6°- des mesures, beaucoup plus sporadiques, ont été effectuées sur la BENOUE à GAROUA (Nord-Cameroun) par la Mission Logone-Tchad (O.R.S.O.I.) et à BOGO dans la même région.

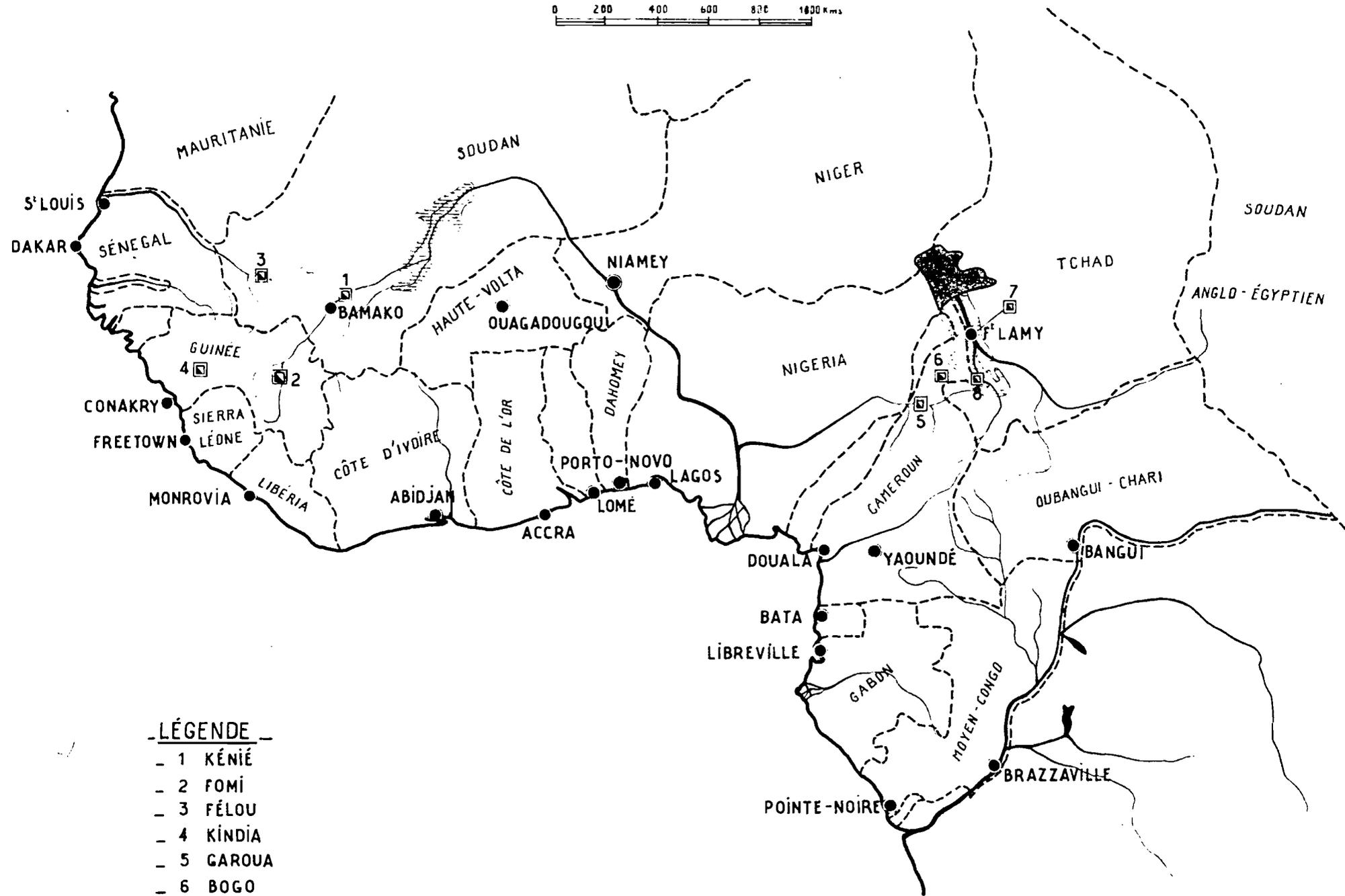
Les études les plus complètes ont été effectuées au site de KENIE. Ce site était particulièrement favorable par suite de la présence d'un certain nombre de mares laissées par le NIGER après la décrue, mares que l'on pouvait supposer étanches et qui permettaient de comparer les résultats des bacs à ceux d'une retenue de faible superficie.

On a donc utilisé à la fois des bacs enterrés, des bacs flottants et deux mares. Les bacs en tôle utilisés avaient une section horizontale carrée (côtés : 920 mm. - profondeur : 460 mm.). Pour les bacs utilisés par la Mission Konkouré, des dimensions légèrement différentes d'une cuve à l'autre avaient été prévues pour permettre de les emboîter, ce qui facilitait le transport. Les bords étaient rabattus sur le pourtour. On a constaté depuis qu'il pouvait être intéressant d'incliner légèrement les bords des cuves vers l'extérieur de façon qu'au moment des pluies les gouttes d'eau sur le pourtour des cuves ne viennent pas tomber à l'intérieur.

Les bacs flottants de KENIE étaient installés dans les mares dont il a été question plus haut. La cote de l'eau à l'intérieur et à l'extérieur de la cuve était sensiblement la même, le bord supérieur des cuves étant à 10 cm. au-dessus de la surface de l'eau.

# SITUATION DES BACS D'ÉVAPORATION

0 200 400 600 800 1000 Kms



## LÉGENDE

- 1 KÉNIÉ
- 2 FOMI
- 3 FÉLOU
- 4 KINDIA
- 5 GAROUA
- 6 BOGO
- 7 F'LAMY
- 8 LAÏ

Les bacs enterrés dépassaient le sol de 10 cm. le niveau de l'eau à l'intérieur des cuves coïncidait avec la surface du sol. Ces bacs étaient situés le plus près possible des bacs flottants, dans le lit apparent du fleuve, mais nettement au-dessus de la nappe phréatique, de façon à éviter toute influence thermique perturbatrice par suite de remontées capillaires. On a cherché, autant que possible, à donner aux bacs flottants et cuves enterrées la même exposition au vent et à les placer dans le même micro-climat.

Les mesures de hauteurs d'eau évaporée étaient effectuées au moyen de pointes de mesures NEYRPIC installées au centre de façon à éviter toute erreur pour le cas où le plan supérieur des bacs n'aurait pas été exactement parallèle au plan d'eau.

On relevait pour chaque mesure, outre la hauteur d'eau évaporée :

- la température superficielle de l'eau dans le bac
- les températures de l'air sèches et mouillées au moyen du thermomètre-fronde.

On utilisait pour les relevés de l'évaporation PICHE les données du Service Météorologique de BAMAKO. Ce procédé n'est pas recommandable car les stations-météo sont, en général, au voisinage des aéroports et loin des fleuves, donc soumises à des conditions climatologiques légèrement différentes. Les données de l'évaporomètre PICHE auraient peut-être été différentes à KENIE de celles de la station de BAMAKO, malgré la grande régularité des données climatologiques tropicales. Il n'y avait pas d'anémomètre au KENIE pour des raisons que nous expliquerons plus loin. C'est également une erreur.

Nous signalerons quelques difficultés que l'on rencontre habituellement dans ces mesures :

1°) les perturbations apportées par les animaux qui viennent boire, en particulier les moutons. Ceci ne joue guère que pour les bacs enterrés. Ils ont été entourés soit d'une clôture en fil de fer barbelé, soit d'une clôture d'épineux.

Les oiseaux, peu nombreux, n'étaient pas à craindre. Les bacs enterrés étaient situés non loin des mares ou du NIGER où ils stationnaient en général; rien ne les attirait près de ces bacs.

.../

Nous avons toujours évité de mettre des toiles protectrices au-dessus des bacs : de telles dispositions seraient de nature à perturber dans de fortes proportions l'action du soleil et du vent.

Les interventions des passants, et surtout des enfants, peuvent être beaucoup plus graves. Nous avons eu de sérieux déboires à ce sujet en 1949 au cours des premières mesures effectuées sur le NIANDAN. C'est ainsi que certains jours on avait relevé des pertes par évaporation atteignant 40 mm. La plus curieuse intervention à ce sujet est celle d'un de nos chefs d'équipe qui, ayant constaté que nous surveillions de très près la quantité d'eau contenue dans le récipient, venait tous les matins avec beaucoup de bonne volonté rajuster le niveau de l'eau à la cote du jour précédent, sans nous en avertir bien entendu.

2°) Une autre difficulté à laquelle nous ne nous attendions pas et qui s'est produite à KINDIA résulte du maintien d'une nappe d'eau stagnante au milieu d'une agglomération où des mesures sévères sont prises contre la propagation du paludisme. Pour éviter toute réclamation, de nombreux essais ont été effectués pour arrêter le développement des larves : emploi de D.D.T. et de produits divers, sans beaucoup de résultats. Il n'était pas possible de couvrir les bacs de pétrole, ce qui aurait complètement arrêté l'évaporation. Le problème a été résolu de la façon suivante : un poisson de taille moyenne a été affecté à chacun des bacs et il s'est très bien acquitté du petit travail de police que nous lui avons confié, sans fausser, du moins nous le pensons, les résultats.

3°) Un problème délicat était posé par le nombre de mesures journalières et les heures auxquelles elles devaient être effectuées. Nous avons vu que tous les facteurs d'évaporation varient beaucoup au cours d'une même journée, surtout en saison sèche. Il a été nécessaire d'utiliser des méthodes expédiées.

Nous opérons de la façon suivante à KENIE :

Le niveau des cuves était mesuré chaque matin entre 7 et 8 h. Les températures sèches et humides de l'air, la température superficielle de l'eau étaient relevées le matin entre 7 et 8 h., et au début de l'après-midi, entre 14 et 15 h., au voisinage du maximum.

.../

Nous avons renoncé à mesurer le vent pour les raisons suivantes :

Pendant toute la saison sèche la vitesse du vent reste faible, sauf au moment des tornades classiques pendant lesquelles il ne souffle avec violence que pendant quelques minutes. Seules les tornades sèches au début de la saison des pluies peuvent donner lieu à des vents assez violents, de durée notable. L'harmattan ne se traduit pas au sol par des phénomènes violents. Il en est d'ailleurs tenu compte dans les mesures puisqu'il influe directement sur la température. Il ne reste guère que la brise qui suit le lit général du NIGER, brise faible, se produisant l'après-midi et dont il serait difficile de tenir compte puisqu'elle ne dure que quelques heures et qu'elle n'apparaît pas dans les données des stations météorologiques situées trop loin des fleuves.

D'autre part, nous avons cherché des corrélations dans les indications données sur le vent pour ces stations et l'évaporation journalière, sans aucun résultat.

Nous avons préféré, pour les études reliant l'évaporation aux facteurs climatologiques, englober l'action du vent dans le facteur constant  $K$  de la formule  $e = K (F - f)$ . Cette approximation nous semble d'autant plus justifiée que la brise fluviale apparaît très régulièrement. Pour un mois donné, elle peut donc intervenir dans un coefficient constant. Il est certain que dans les études présentant un caractère plus permanent que celles qui ont été effectuées par Electricité de France, il y aurait intérêt à effectuer des mesures à l'anémomètre. Nous avons l'impression que cette brise joue un très grand rôle dans l'évaporation, surtout en Mai, époque à laquelle l'eau est surchauffée.

Pour ces mêmes mesures de température et de vent l'idéal aurait été de pouvoir enregistrer les variations tous les jours, ce qui n'aurait d'ailleurs pas simplifié le dépouillement.

Indépendamment des mesures sur bacs Colorado, des études ont été effectuées dans des mares fermées : deux mares avaient été retenues dans le lit apparent du NIGER, la mare A et la mare B.

.../

La mare A a une longueur de 600 m., largeur moyenne 80 m. Sa profondeur dépasse 8 m. sur la plus grande partie de sa longueur. Elle aurait pu présenter un très grand intérêt étant donné cette grande profondeur. Malheureusement, une partie du pourtour est occupée par des alluvions par lesquelles les nappes aquifères viennent apporter un faible débit dans la mare comme nous avons pu le constater après les mesures d'évaporation. Cette mare ne constituait donc pas un système isolé.

La mare B était située entièrement dans un rocher parfaitement sain. Dès le mois de mars cette mare était complètement isolée du NIGER. L'examen des mesures d'évaporation nous a montré qu'elle ne recevait aucun apport et qu'il ne pouvait y avoir d'autres pertes que celles correspondant à l'évaporation. Sa longueur est de 200 m. Sa largeur est de 40 m. Malheureusement, sa profondeur est faible, de l'ordre de 0,50 à 1,50 m.

On relevait la hauteur d'eau évaporée journellement au moyen de pointes de mesure installées sur un bâti scellé dans le rocher constituant les berges. La hauteur évaporée était relevée une fois par 24 h. La température superficielle était relevée deux fois par jour, dans les mêmes conditions que pour les bacs.

Les observations ont été effectuées par l'ingénieur hydraulicien qui dirigeait ces études du 19 avril au 20 mai 1952. A partir d'octobre 1952, les observations ont été reprises par un ingénieur hydraulicien assisté d'un opérateur africain qui, à partir de novembre, a effectué les mesures seul, mais sous un contrôle sévère. On a dû renoncer à faire apprécier le 1/10<sup>e</sup> de mm. par ce dernier observateur. C'est pourquoi les mesures à partir de cette date présentent une dispersion plus grande.

Les études effectuées pour l'estimation de la hauteur d'eau annuelle évaporée ont montré que, dans l'ensemble, cette dernière série d'observations était assez exacte.

Pour tous les autres postes, les observations étaient effectuées par des ingénieurs ou des agents techniques européens.

.../

## RESULTATS BRUTS

Les résultats bruts des observations sont exposés dans le tableau n° 1. Bien que ces mesures n'aient porté que sur des périodes de courte durée, les résultats ont cependant une certaine valeur du fait que l'évaporation dépend de facteurs tels que la température qui varie assez peu d'une année à l'autre, beaucoup moins que les précipitations et surtout que les débits. Les hauteurs d'eau évaporées chaque mois doivent donc se rapprocher très sensiblement des moyennes interannuelles correspondant à un bac de même type, installé exactement dans les mêmes conditions et dans la même situation.

Le tableau n° 1 met en évidence le caractère sporadique des observations. Il est difficile à exploiter sous cette forme soit pour l'examen des variations saisonnières en un point donné, soit pour les variations de l'évaporation d'un point à un autre de l'A.O.F. Il nous a semblé nécessaire de le compléter avant d'entreprendre toute interprétation.

## ESTIMATIONS DES HAUTEURS D'EAU EVAPOREES ANNUELLEMENT

Nous déterminerons tout d'abord le montant total de l'évaporation annuelle dans les différents cas en estimant pour les mois manquants l'évaporation mensuelle à partir des données climatologiques fournies par la station météorologique la plus proche. Nous utiliserons, d'une part, des formules du type de la formule de DALTON, pour lesquelles le coefficient constant sera déterminé à partir des observations déjà effectuées. D'autre part, nous comparerons les données de l'évaporation de l'appareil PICHE de la station météorologique de référence aux hauteurs d'évaporation trouvées dans les bacs pour les mois observés et nous essaierons d'en déduire des règles applicables pour les mois n'ayant pas fait l'objet d'observations directes.

Notons que la formule de DALTON s'applique en toute rigueur à un facteur  $F$  dépendant directement de la température superficielle de l'eau dans le bac alors que les stations météorologiques donnent uniquement les températures sèche et humide de l'air ambiant.

.../

-TABLEAU I-

ÉVAPORATIONS OBSERVÉES  
(mm par jour)

	FÉLOU	KĒNIÉ	FOMI	KINDIA	
	Bac enterré U.H.E.A	Bac flottant	Bac flottant	Bac enterré	Bac enterré
JANV.		7		6,5	
FÉV.		6 (1)			
MARS.					
AVRIL					
MAI.	8,4 (2)	8 +	5,6 +		
JUIN.	6,3		4,8 +		
JUIL.	4,5 + (1)		3,2 +	2,7 +	
AOÛT.				1,3 +	4,5
SEPT.				2,9 +	5,3
OCT.		4 (2)		3,0 +	7
NOV.		5		3,5 +	10,6
DÉC.		5		5,9	11,2

(1) Première décade du mois seulement.

(2) Deuxième quinzaine.

+ Correction faite pour tenir compte des jours de pluie

Même si nous supposons que le bac est situé à la station météorologique, les valeurs des températures maxima et minima de l'air et de l'eau sont différentes; nous avons pensé que les moyennes étaient assez peu voisines et que par suite, il était possible de remplacer la température moyenne superficielle de l'eau par la température moyenne de l'air. Mais l'application brutale de la formule de DALTON à partir des températures d'air sec, nous a donné des valeurs d'évaporation nettement surestimées et c'est normal.

La courbe de température de l'air présente un creux sur une longue période et une pointe plus courte. Par suite la moyenne arithmétique du maximum et du minimum de température est supérieure à la température moyenne de l'air et, par suite, aux températures de l'eau qui se rapprochent de cette température moyenne, à plus forte raison lorsque l'on considère les valeurs de  $F$  correspondantes.

Aussi, nous avons dû prendre en considération deux coefficients différents :

1°) le coefficient  $K$  de la formule de DALTON appliquée à  $F$  correspondant aux températures superficielles de l'eau toutes les fois que cela a été possible. Nous avons pu ainsi vérifier s'il ne s'était pas glissé d'erreurs de détail dans nos opérations. Par ailleurs, les valeurs des coefficients ainsi trouvés nous ont été utiles pour la suite de notre étude;

2°) le coefficient  $K_1$  d'une formule identique à celle de DALTON -  $e = K_1 (F - f)$  - qui s'appliquerait d'une part aux évaporations réellement observées, d'autre part, aux valeurs de  $F$  correspondant aux températures de l'air relevées à la station météorologique la plus proche; ( $F$  est la moyenne pondérée des trois valeurs correspondant aux températures prises à 6 h., 12 h. et 18 h.), procédé fort peu orthodoxe mais c'est le seul qui puisse être employé pour rattacher l'évaporation aux données climatologiques des stations météorologiques.

Le rattachement des observations aux relevés des évaporomètres PICHE était heureusement immédiat. Nous avons défini un coefficient  $K_p$  : rapport entre évaporation mensuelle mesurée dans le bac et évaporation mesurée à l'appareil PICHE.

.../

Pour les différents sites nous avons opéré comme suit :

a) Site du KENIE :

Le coefficient  $K$  a été déterminé comme suit :

Pour chaque mois on a porté sur un graphique, d'une part, en ordonnée, les valeurs de l'évaporation de chaque jour en mm. et, d'autre part, en abscisse la valeur  $(F - f)$  calculée à partir des mesures effectuées le matin et au début de l'après-midi.

En théorie, nous aurions dû enregistrer chaque jour les différentes températures intervenant dans le calcul de  $(F - f)$  et les variations de l'évaporation heure par heure découper en tranches horaires les différents graphiques et pour chaque tranche d'une même journée, comparer  $(F - f)$  à  $e$ . Il aurait fallu alors grouper tous les points dans un même nuage ou établir une série de nuages de points correspondant à chaque tranche horaire. Plus simplement, on aurait pu comparer la moyenne de  $(F - f)$  à l'évaporation journalière totale.

De toutes façons, cette étude aurait exigé sur place un appareillage compliqué dont la mise au point aurait été laborieuse et dont on ne pouvait concevoir l'installation et l'utilisation dans le cadre d'une mission d'études qui ne devait pas rester sur place plus d'un an et pour laquelle l'étude de l'évaporation ne constituait qu'une tâche secondaire.

La solution adoptée, beaucoup plus simple, consiste à calculer chaque jour la valeur de  $(F - f)$  correspondant aux deux séries de mesures de température, prendre la moyenne des deux valeurs trouvées et la comparer à la hauteur d'évaporation journalière.

Le graphique n° III ainsi établi montre une certaine dispersion. La dispersion est plus grande bien entendu pour les périodes pendant lesquelles les mesures ont été faites à 1 mm. près au lieu du  $1/10^{\circ}$  de mm. Cette dispersion est due soit à une mauvaise appréciation des lames d'eau évaporées (étant donné l'échelle des graphiques on voit qu'une erreur de  $1/10^{\circ}$  de mm. est déjà très sensible), soit à l'influence du vent qui peut agir de façon irrégulière d'un jour à l'autre sans cependant que les écarts soient bien grands et soit enfin par suite de la grande irrégularité de l'évaporation d'un jour à l'autre et de l'adaptation imparfaite de la formule aux phénomènes observés. Il semble que ce soit cette dernière cause qui ait joué le plus souvent.

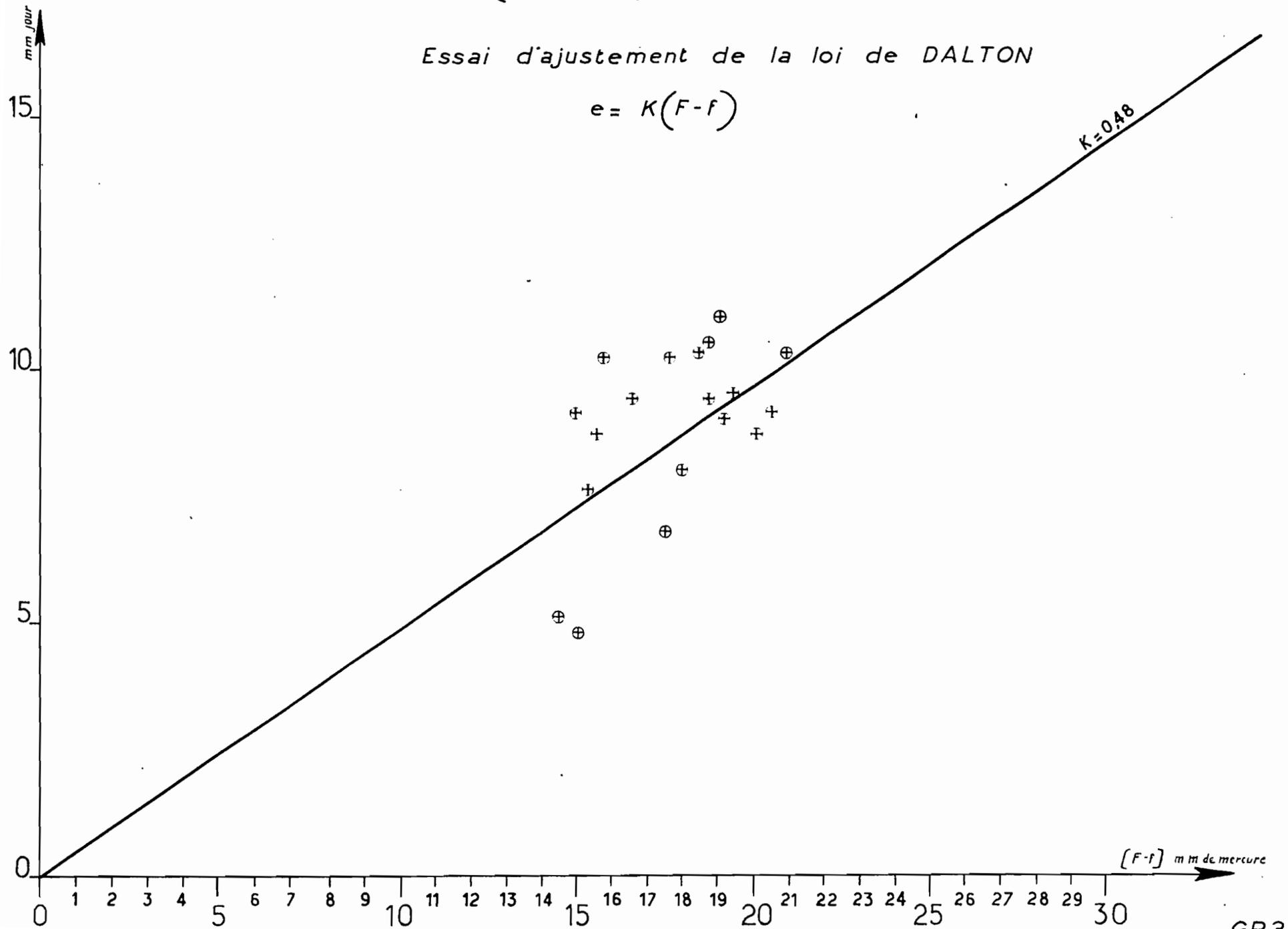
.../

- MESURES D'ÉVAPORATION AU KÉNIÉ -

- (SOUDAN) MAI 1952 -

Essai d'ajustement de la loi de DALTON

$$e = K(F-f)$$



Dans l'ensemble, on peut assez facilement, pour chaque nuage de points, tracer une droite précisant la valeur du coefficient  $K$ . Cette droite correspond à une valeur médiane des observations. Elle laisse autant de points en dessus qu'en dessous. Cette façon d'opérer évite des erreurs correspondant aux points trop aberrants.  $K$  varie assez peu pendant la période d'observations (0,39 à 0,48); il semble qu'il soit légèrement plus fort en saison des pluies qu'en saison sèche.

Les observations effectuées à KENIE permettent, sans trop d'extrapolations hasardeuses, de préciser la valeur du coefficient  $K$  pendant toute l'année, sauf pour la saison des pluies : juin, juillet, août, septembre. C'est d'ailleurs cette période qui présente le plus de difficultés en général.

D'autre part, pour les mêmes périodes et exactement dans les mêmes conditions, nous avons estimé les diverses valeurs de  $K_1$ . Cette étude a été effectuée uniquement sur les bacs flottants A et C.  $K_1$  varie dans le même sens que  $K$  mais de façon nettement plus forte (0,30 à 0,60 ?).

L'étude comparative des résultats des bacs et des données d'évaporomètres PICHE observés à la station de BAMAKO a permis de constater une corrélation relativement serrée entre les deux séries d'observations. Malheureusement le rapport varie dans de fortes proportions suivant les saisons, entre 0,75 et 1,33 les variations étant parallèles à celles de  $K_1$  et de  $K$ .

b) Site du FELOU :

Les observations ont uniquement porté sur la période la plus chaude de l'année.

On notera un très grand écart entre les résultats des deux bacs enterrés faisant l'objet des observations. Ils étaient pourtant identiques et relevés par le même observateur, mais l'un était situé au voisinage d'un thalweg secondaire, l'autre sur un plateau surchauffé, d'où de grandes différences de  $f$ . Nous avons retenu les valeurs de la cuve U.H.E.A. qui correspondent mieux aux conditions d'une cuve enterrée dans le lit apparent.

.../

Les températures sèches et mouillées de l'air, ainsi que la température de l'eau de la cuve, n'étaient relevées qu'à 7 h. du matin, ce qui est insuffisant pour faire une étude sérieuse pour l'application stricte de la formule de DALTON.

Nous n'avons donc pu calculer que  $K_1$  d'après les données de la station météorologique de KAYES.

Une difficulté particulière se présente : les changements de saison sont brutaux et ne coïncident pas forcément avec le début des différents mois. En particulier, en 1952, la saison des pluies s'est installée dans la région du FELOU le 10 Juin. Nous bloquons donc les dix premiers jours de Juin avec les dix derniers jours de Mai et les vingt derniers jours de Juin avec les dix premiers jours de Juillet. Nous obtenons ainsi deux droites qui correspondent à  $K_1 = 0,35$  et  $k_1 = 0,50$ . Ce dernier chiffre est très élevé.

Nous retrouverons un fait comparable au NIANDAN, pour  $K$ .

Nous avons également comparé les valeurs de l'évaporomètre PICHE relevées à KAYES aux évaporations journalières observées au FELOU au bac U.H.E.A. en divisant la période de la même façon que nous l'avons fait pour l'étude du coefficient  $K$ . Nous arrivons à des valeurs assez différentes du rapport évaporation-bac/évaporation-Piche pour les deux mois étudiés :  $K_p = 0,80$  et  $1,20$ .

Nous avons constaté pour le KENIE et nous constaterons pour le NIANDAN que ce rapport augmente rapidement de la saison sèche à la saison des pluies.

### c) Site du NIANDAN

Deux bacs avaient été installés : un bac flottant et un bac enterré. Les observations ont porté sur le début de la saison des pluies et le début de la saison sèche. On note une très grande différence entre les résultats de saison des pluies du bac enterré et du bac flottant. Ceci est probablement dû au fait que le bac enterré était situé en dehors du lit apparent et, en plus, que les herbes n'avaient été fauchées que dans un rayon de 7 à 8 m. autour de la cuve enterrée. Cette dernière se trouvait être absolument à l'abri de la brise qui suivait le cours du NIANDAN. On notera d'ailleurs que la différence la plus forte est observée en mai mois le plus chaud. Dans ces conditions, le moindre mouvement d'air devait avoir une très grande influence sur l'évaporation.

.../

Par ailleurs, si, au KENIE, la cuve était située dans l'eau d'une mare isolée, soumise uniquement à l'influence thermique solaire, il n'en était pas de même au NIANDAN où la cuve était dans le lit du cours d'eau. Par suite, les premières crues arrivant en 1952, en Juin et Juillet, avaient pour effet de changer la température de la cuve indépendamment de l'influence du soleil. Il y a là un nouveau facteur de dispersion. On notera cependant que ce facteur correspond sensiblement à la réalité puisque dans une retenue un phénomène analogue se produirait, très atténué cependant.

Les températures de l'eau et de l'air n'ont pas été relevées de façon régulière. Pour le calcul de  $F$  et de  $f$  nous n'avons donc déterminé que  $K$ , comme pour le bac du FELOU.

Nous ne prendrons en considération que le bac flottant. Il est possible de calculer  $K$  pour la fin de la saison sèche, le début de la saison des pluies et le début de la saison sèche. Pour le mois de Mai 1952 où les pluies ont tardé à faire leur apparition, nous avons séparé le début du mois qui correspond bien à la fin de la saison sèche (avril dans le cas général). Comme pour le FELOU, nous avons dû bloquer une partie du mois de Mai et du mois de Juin et séparer les premiers jours de Juin qui correspondent nettement à la saison des pluies. Il est très difficile d'évaluer  $K$  en Juillet par suite du très grand nombre de jours de pluies.

Le coefficient  $K_1$  varie pour le bac flottant de 0,20 en décembre à 0,75 en juin. La valeur moyenne, 0,45, est toujours du même ordre que celle observée au KENIE.

Le rapport  $K_p$  entre les résultats des différents bacs et les résultats de l'évaporomètre PICHE à la station de KANKAN, présente un groupement assez net, le coefficient  $K_p$  croissant de 0,50 en décembre à probablement 1,70 en juin-juillet.

Selon toute vraisemblance, le coefficient  $K$  paraît être plus fort encore en pleine saison des pluies. Par ailleurs, le fait d'utiliser un évaporomètre PICHE situé à 80 km. du point d'observation, pourrait donner lieu à quelques inquiétudes. Heureusement, l'évaporation a été observée à cet appareil pendant un mois (décembre) sur le site même du barrage de FOMI. La comparaison avec les résultats de l'appareil de KANKAN montre une bonne corrélation journalière. Le rapport entre les observations des deux appareils était de 0,80. Il est probable que ce rapport n'est pas constant toute l'année. Il doit passer par un minimum vers le mois de mars-avril et être à peu près égal à l'unité pendant les mois les plus humides de l'année.

d) Site de KINDIA

Pour KINDIA nous avons des observations assez nombreuses en saison des pluies : juillet à novembre 1953. Mais pour la détermination de  $e$ , comme pour la détermination de  $K$ , les difficultés sont sérieuses. La hauteur d'eau précipitée au cours d'une averse ne peut guère être déterminée avec une précision supérieure à 5%, soit 1 mm. pour une précipitation de 20 mm. Cette imprécision est très grande si elle est comparée à la faible valeur de l'évaporation de cette période, soit 3 à 5 mm. les jours sans pluie et certainement moins les jours d'averses. Les lectures journalières n'ont pas grande signification de ce fait.

Il n'est pas possible d'éliminer tous les jours de pluie comme nous l'avons fait pour les régions soudanaises car la fréquence des précipitations étant beaucoup plus grande en zone guinéenne, cela reviendrait à éliminer la presque totalité des observations.

Nous avons donc pris en considération à la fois les jours sans pluie et les jours de faible pluie (ne dépassant pas 10 mm.) pour lesquels l'erreur instrumentale des pluviomètres ne risque pas trop de fausser les résultats. Le pluviomètre de KINDIA est d'ailleurs très voisin du bac. En opérant ainsi on obtient pour les jours de faible pluie des valeurs très homogènes de 1 à 2 mm. pour la lame d'eau évaporée.

Nous avons cherché, par ailleurs, à déterminer les hauteurs d'eau totales évaporées pendant les deux mois d'observations, juillet et août, sans séparer les jours de pluie. Nous obtenons 3 mm. pour le mois de juillet et 1 mm. pour le mois d'août.

En fait, il serait imprudent de se fier à ces chiffres. Les précipitations en juillet ont dépassé 400 mm. et 600 mm. en août. Les valeurs de l'évaporation trouvée sont de l'ordre de grandeur des erreurs dans l'estimation des précipitations. Il semble toutefois que les précipitations soient nettement diminuées les jours de fortes pluies. Quoiqu'il en soit pour la détermination de  $K$ ,  $K_1$  et  $K_p$  nous n'avons pas tenu compte des jours de fortes pluies (supérieures à 10 mm).

Nous obtenons :

- en juillet pour KINDIA	: $K = 0,48$	$K_1 = 0,9$
- en août	: $K = 0,35$	$K_1 = 1,2$

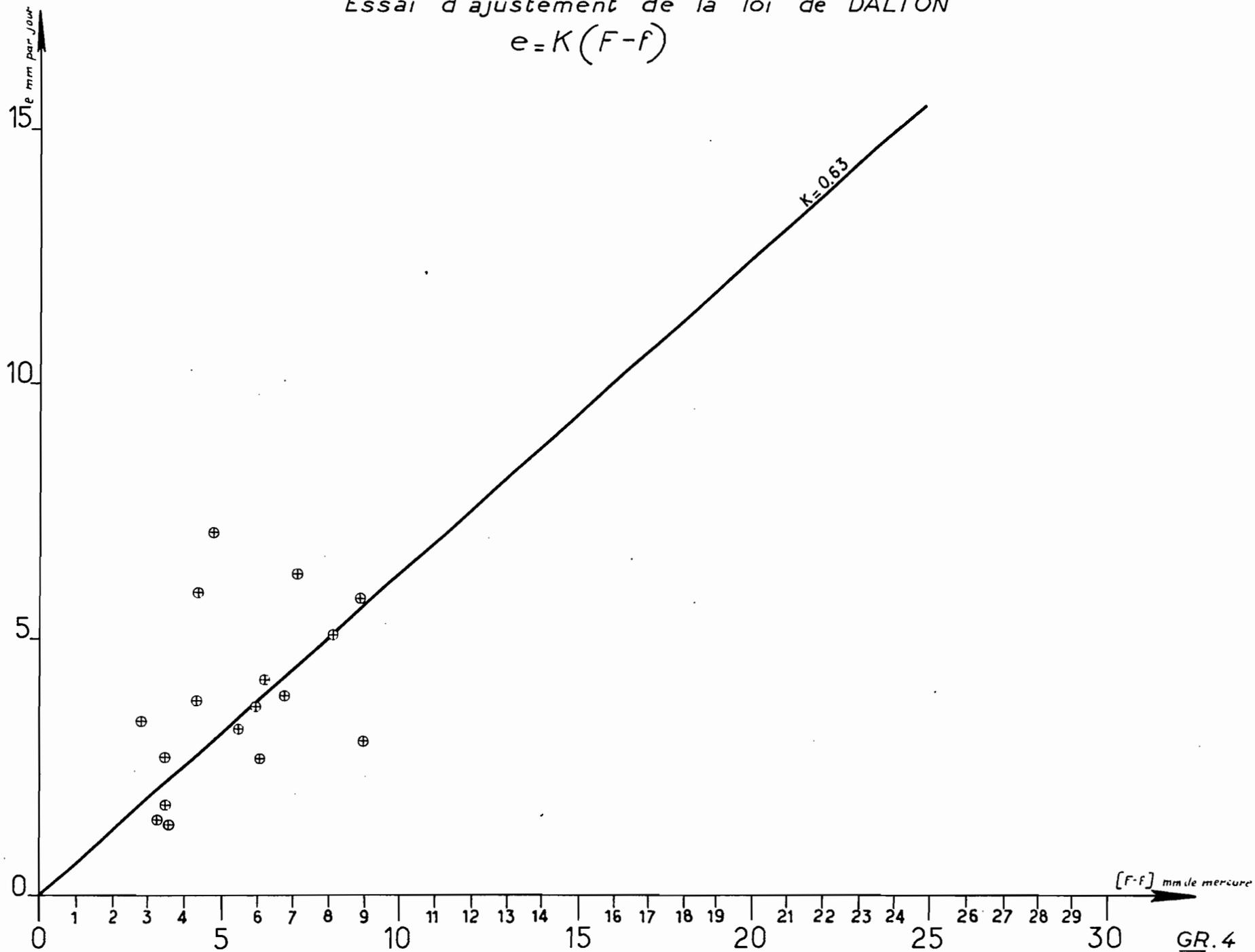
.../

MESURES D'ÉVAPORATION

KINDIA (GUINÉE) Septembre 1953 (jours sans pluie seulement)

Essai d'ajustement de la loi de DALTON

$$e = K(F - f)$$



Ce sont ces valeurs qui ont été portées dans le tableau n° II pour nos premières études.

Le graphique n° VI montre que la dispersion est plus grande qu'en saison sèche, c'est d'ailleurs absolument normal. Cela tient au fait que le degré hygrométrique varie beaucoup plus en saison des pluies d'un jour à l'autre; l'insolation également puisque le ciel est entièrement recouvert de nuages pendant des journées entières, alors que d'autres journées sont absolument sans nuages.

Nous avons porté dans le tableau n° II les valeurs calculées des coefficients  $K$ ,  $K_1$ ,  $K_p$ . Les valeurs de  $K_1$  et  $K_p$  entre parenthèses ont été extrapolées comme nous l'indiquerons plus loin.

Constatons qu'au cours de l'année  $K$  varie assez peu; de même, les différences sont faibles entre les résultats de KENIE et ceux de KINDIA qui correspondent à des climats très différents. Nous vérifions ainsi :

1°) que la formule de DALTON s'applique assez bien aux observations sur les bacs Colorado, malgré les approximations que nous avons faites;

2°) que l'influence du vent est sensiblement la même pour tous les sites (sous réserve que les bacs soient placés dans le lit apparent).

En première approximation, il semble qu'il n'y aurait pas grand inconvénient à prendre  $K$  constant et égal à 0,45.

Nous noterons cependant que ce coefficient varie dans une faible mesure au cours de l'année, le minimum étant atteint en Décembre au moment où l'écart journalier des températures est le plus grand et le maximum en saison des pluies au moment où cet écart est le plus faible. Cette variation de  $K$  correspond probablement à la façon dont nous faisons intervenir les variations diurnes de la température dans le calcul de la moyenne journalière. Une méthode plus judicieuse pourrait peut-être conduire à un coefficient sensiblement constant.

Le calcul de  $K$  sert uniquement pour des vérifications puisqu'il est inutilisable pour l'extrapolation à partir des données des stations météorologiques.

- TABLEAU II -

VALEURS DE K ET K1

	FÉLOU		KÉNIÉ				FOMI		KINDIA	
	Bac enterré U.H.E.A		Bacs enterrés		Bacs Flottants		Bac flottant		Bac enterré	
	K	K1	K	K1	K	K1	K	K1	K	K1
JANV.		(0,30)	0,41		0,44	0,32		(0,25)	0,51	0,59
FÉV.		(0,30)	0,42		0,39	0,27 (4)		(0,30)		
MARS.		(0,33)				(0,35)		(0,40)		
AVRIL.		(0,35)				(0,40)		(0,45)		
MAI.		0,35	0,45		0,48	0,40		0,47	0,41 (3)	
JUIN.		0,50				(0,60)		0,76 (1)		
JUIL.		0,60				(0,70)		0,67 (1)	0,48 (1)	0,90
AOÛT.		(0,75)				(0,70)		(0,75)	0,35 (1)	1,20
SEPT.		(0,75)				(0,70)		(0,70)	0,63	1,15
OCT.		(0,50)	0,49		0,48	0,40 (2)		(0,50)	0,53	1,10
NOV.		(0,35)	0,36		0,46	0,32		0,32	0,50	0,73
DÉC.		(0,30)	0,34		0,42	0,30		0,21	0,63	0,74

(1) Compte tenu uniquement des jours sans pluie ou avec pluie faible .

(2) Deuxieme quinzaine seulement

(3) KALETA

(4) Première quinzaine seulement.

(0,30) Chiffres extrapolés.

TABLEAU II (suite)

VALEURS DE Kp

	FÉLOU	KÉNIÉ		FOMI	KINDIA	KALETA
	Bac enterré U.H.E.A	Bac enterré	Bac flottant	Bac flottant	Bac enterré	Bac enterré
JANV.	( 0,7 )		0,97	( 0,5 )	1,2	
FEV.	( 0,7 )		0,85 (4)	( 0,7 )		
MARS.	( 0,8 )		(1,0 )	( 0,7 )		
AVRIL.	( 0,8 )		(1,0 )	( 0,8 )		
MAI.	0,80		1,20	0,92 (1-2)		0,66 (3)
JUIN.	1,20		( 1,7 )	1,76 (1)		
JUIL.	1,27		( 1,9 )	1,95 (1)	1,8 (1)	
AOUT.	( 1,6 )		( 1,9 )	( 1,9 )	1,5 (1)	
SEPT.	( 1,5 )		( 1,7 )	( 1,7 )	1,9 (1)	
OCT.	( 1,2 )		1,33 (2)	( 1,4 )	1,8 (1)	
NOV.	( 0,7 )	1,05	1,10	0,70	1,5 (1)	
DÉC.	( 0,6 )	0,75	0,85	0,50	1,3	

(1) *Compte tenu uniquement des jours sans pluie ou avec pluie faible*

(2) *Deuxième quinzaine seulement*

(3) *KALETA*

(4) *Première quinzaine seulement.*

(0,70) *Chiffres extrapolés*

Par contre, le coefficient  $K_1$  est de la plus grande utilité pour la détermination de l'évaporation à partir des données usuelles des stations météorologiques, quoique sa signification physique soit moins simple et sa détermination plus imprécise.

L'examen du tableau n° II est assez rassurant. Comme il fallait s'y attendre,  $K_1$  varie assez largement d'un site à un autre et même d'un bac à un autre pour un site donné. Ce dernier point est absolument normal puisque nous relient des résultats d'évaporation et des données météorologiques qui correspondent à des micro-climats différents.

Nous avons atténué ce dernier inconvénient en ne retenant que les résultats des bacs situés dans le lit apparent des cours d'eau ou dans des conditions similaires, auquel cas la différence entre les résultats des bacs enterrés et des bacs flottants est faible (de l'ordre de 10%).

Moyennant cette réserve, nous constatons que les variations saisonnières de  $K_1$  sont parallèles à celles de  $K$  avec minimum en Décembre (grands écarts journaliers de température) et maximum en saison des pluies (faibles écarts de température). Mais l'amplitude est incontestablement plus grande. Ceci s'explique par le fait que  $K_1$  doit corriger la valeur excessive des écarts de la température de l'air par rapport aux écarts de la température superficielle de l'eau.

Il semble que  $K_1$  varie de 0,30 à 0,60 ou 0,70 au FELOU  
de 0,30 à 0,60 ou 0,70 (?) à KENIE  
de 0,21 (?) ou 0,25 à 0,75(?) au NIANDAN

$K_1$  atteint 1,15 à 1,20 en saison des pluies à KINDIA.

L'amplitude est double ou triple de celle des variations de  $K$ .

Il semble que cette amplitude augmente depuis les zones soudanaises (FELOU, KENIE), où nous rencontrons des valeurs presque identiques jusqu'aux zones guinéennes (KINDIA).

Contrairement à ce qui a été exposé plus haut pour le coefficient  $K$ , il n'est pas possible d'adopter un coefficient  $K_1$  valable pour toute l'année et à plus forte raison pour tous les sites.

.../

Pour extrapoler les valeurs de  $K_1$  nous nous inspirerons du parallélisme observé entre les variations de  $K_1$  et comme, nous le verrons plus tard, de  $K_p$ .

Chaque site présente des difficultés particulières:

- Site de KENIE :

Il est assez difficile d'interpoler les valeurs de  $K_1$  pour la saison sèche: nous disposons des premiers jours de Mai correspondant sensiblement aux données d'Avril, mois le plus chaud de l'année, et des données de Décembre, Janvier et Février.

Par contre, pour la saison des pluies, nous n'avons aucune observation directe, les mesures ayant été arrêtées à cette époque, (on craignait à tort, que les précipitations n'interdisent toute observation). L'extrapolation est beaucoup plus délicate. Les mesures effectuées sur le NIANDAN, à KINDIA et même au FELOU montrent que  $K_1$  est assez élevé, et comme nous l'avons dit plus haut, que, à cette époque  $K_1$  croît dans la zone soudanienne à la zone guinéenne. C'est pourquoi nous avons adopté pour la pleine saison des pluies à KENIE la valeur 0,70 pour les jours sans pluie. Ce chiffre est assez incertain, mais l'évaporation est faible à cette époque. Nos approximations ne risquent pas de nous conduire à de graves erreurs sur la lame d'eau évaporée annuellement.

- Site du FELOU :

Les observations n'ont porté que sur une courte période. Compte tenu du décalage des saisons des pluies entre bassin du SENEGAL et bassin du NIGER, on retrouve pour  $K_1$  des valeurs très analogues à celles observées à KENIE et à FOMI. Nous n'avons considéré que le bac U.H.E.A. situé dans un thalweg.

On note des observations précieuses en Juillet sur la croissance de  $K_1$  en saison des pluies.

Nous avons reconstitué les mois manquants en supposant que le coefficient variait dans les mêmes conditions qu'à KENIE. Nous verrons, par la suite, que les chiffres trouvés, correspondent bien aux données de l'évaporomètre PICHE.

- Site du NIANDAN :

Nous n'avons retenu que les résultats du bac flottant : on observe un parallélisme satisfaisant entre les variations de  $K_1$  à KENIE et à FOMI. L'amplitude des variations

.../

est un peu plus forte à cause de la différence de situation des stations météorologiques de référence et certainement aussi à cause de la différence de latitude.

$K_1$  a été reconstitué assez facilement en saison sèche, beaucoup moins en saison des pluies. L'exemple de KINDIA nous montrera une grande dispersion des valeurs de  $K_1$  à cette époque, Notons toutefois que  $K_1$  pour Juin et Juillet 1952 à FOMI, correspond sensiblement à  $K_1$  en Novembre à KINDIA pour des degrés hygrométriques semblables.

Nous avons admis respectivement pour Août et Septembre : 0,75 et 0,70, chiffres peut-être un peu faibles si l'on se réfère aux données de KINDIA.

- Site de KINDIA :

Les observations portent uniquement sur la saison des pluies  $K_1$  est très élevé : il varie de 0,73 en Novembre à 1,20 en Août.

La saison des pluies présente beaucoup moins de jours ensoleillés qu'au NIANDAN et à plus forte raison qu'à KENIE. Les valeurs de  $K_1$  trouvées à KINDIA correspondent probablement à un plafond pour l'A.O.F.

Etant donné les différences de climat avec les trois sites précédents, nous avons préféré ne pas reconstituer les mois de saison sèche manquants. D'après les observations faites à KALETA, il semble cependant que les valeurs de  $K_1$  en saison sèche ne soient pas très différentes de celles que nous avons déjà trouvées pour les autres sites.

D'autre part, la comparaison des données de l'évaporomètre PICHE à la station météorologique la plus proche et des relevés directs de l'évaporation dans les différents bacs a été effectuée pour les quatre sites étudiés. Les relevés de KENIE les plus complets  $K_p$  montrent que le rapport (évaporation bac/évaporation Piche), subit des variations sensiblement parallèles à celles de  $K_1$  avec, malheureusement, une plus forte amplitude encore.

Les coefficients de saison des pluies sont assez incertains, mais heureusement les valeurs de l'évaporation à cette époque sont faibles. Nous relevons un certain parallélisme entre les variations aux diverses stations avec, cependant, des valeurs moins homogènes que pour  $K_1$ . C'est ainsi que le minimum à KENIE semble être de 0,85 alors qu'il est de 0,50 à FOMI. Ceci peut s'expliquer peut-être par le fait que l'évaporomètre PICHE amplifie les écarts de (F - f).

.../

Or,  $(F - f)$  varie peut être beaucoup plus d'un site à l'autre que les autres facteurs intervenant dans la loi de DALTON. C'est ainsi, par exemple, qu'entre le site de FOMI et la station météorologique de KANKAN nous savons, d'après des relevés faits en fin de saison des pluies que les indications données par l'évaporomètre PICHE de KANKAN sont supérieures de 20% en moyenne à celles du même appareil installé à FOMI. Nous ne pensons pas qu'on aurait trouvé de tels écarts entre le site de KENIE et la station météorologique de BAMAKO ou entre le bac U.H.E.A. du FELLOU et la station météorologique de KAYES.

L'examen du tableau n° II montre bien que les divers coefficients trouvés s'appliquent uniquement à des relations entre bacs déterminés et des stations météorologiques également bien déterminées. Il se peut que, si l'on change la position des bacs par exemple, on trouve des coefficients de valeurs voisines avec des variations absolument parallèles; mais de toute façon, il sera nécessaire de faire des corrections qui peuvent atteindre jusqu'à 30 ou 40% d'une station à l'autre, pour les mois présentant les plus grands écarts.

Il ne faut pas oublier non plus dans l'étude de ces divers coefficients que la saison des pluies n'arrive pas à la même date pour les divers bassins, de sorte que les mois de transition peuvent avoir, pour certaines stations, des coefficients de saison sèche alors qu'ils correspondent à des coefficients de saison des pluies à d'autres stations.

Enfin la pratique qui consiste à prendre 50% de l'évaporation PICHE pour une retenue de grande superficie est à proscrire.

A partir de ces données, nous avons déterminé, dans le tableau n° III, les hauteurs d'eau évaporée chaque mois pour l'année 1952.

Pour les mois de saison des pluies, nous avons appliqué les coefficients  $K_l$  et  $K_p$  du tableau II aux jours sans pluie ou avec faibles pluies. Pour les jours de pluie nous avons supposé des évaporations correspondant à la moitié de la moyenne des jours de pluie. Cette correction semble justifiée par les observations à l'évaporomètre PICHE pour les jours de pluie.

.../

- TABLEAU III -

ÉVAPORATIONS JOURNALIÈRES

en mm

	FÉLOU				KÉNIÉ				FOMI			
	Bac enterré				Bac flottant				Bac flottant			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
JANV.		5,4	6,1	6	7	—	—	6		4	4	4
FÉV.		7,7	7,9	8	6 (1)	—	—	7		5,9	6,7	6
MARS.		11,2	10,7	11		10,2	8,6	9		8	6,2	7
AVRIL.		12,3	11,8	12		12,6	9,7	11		7,4	6,6	7
MAI.	8,4	—	—	8,5	8 +	—	—	8	5,6 +	—	—	5,5
JUIN.	6,3	—	—	6,5		6,2	4,7	5	4,8 +	—	—	5
JUIL.	4,5 +	—	—	4,5		3,6	2,9	3	3,2 +	—	—	3
AOÛT.		4,0	3,2	4		3,2	2,5	2,5		2,4	2,8	2,5
SEPT.		3,0	2,1	3		3,1	2,5	2,5		2,4	2,4	2,5
OCT.		4,1	3,5	4	4 (2)	—	—	4		3,9	3,1	3,5
NOV.		5,6	5,2	5,5	5	—	—	5		3,2	3,1	3
DÉC.		5,9	5,6	6	5	—	—	5,5		2,8	3,0	3
<u>TOTAL</u> <u>ANNUEL :</u>				2,40				2,10				1,60

a : Valeurs expérimentales.

b : D'après la loi de DALTON.

c : D'après évaporimètre PICHE.

d : Valeurs admises.

(1) Première décade du mois seulement

(2) Deuxième quinzaine.

+ Correction faite par jour de pluie

L'emploi simultané des coefficients  $K_1$  et  $K_p$  nous a fourni des recoupements très utiles.

Nous obtenons, en définitive, pour l'année 1952 :

- au FELOU, sur bac enterré ..... 2.40 m
- à KENIE, sur bac flottant ..... 2.10 m
- au NIANDAN, sur bac flottant ..... 1.60 m

Ces valeurs confirment sensiblement celles que nous avons précédemment admises à la suite des extrapolations beaucoup plus sommaires. Comme nous le verrons plus loin, elles ne s'appliquent qu'à des situations bien déterminées. La disposition des cuves est telle, en général, que l'on se rapprochait le plus possible du cas d'une retenue. Nous signalons, en particulier, que dans la région de KAYES, on peut obtenir avec des bacs installés sur des plateaux de grès surchauffés, des évaporations annuelles beaucoup plus fortes. On arriverait également dans la vallée du NIANDAN à des résultats atteignant peut être 2 m., si les bacs étaient installés sur les cuirasses latéritiques des plateaux. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

L'étude des relevés des évaporomètres PICHE montre que pour ces régions tropicales l'écart entre les résultats d'une année à forte évaporation et d'une année moyenne est de l'ordre de 15%.

L'examen des résultats de l'année 1952 montre que l'évaporation a été forte à KAYES,  
légèrement faible à BAMAKO,  
forte à KANKAN.

Mais les relevés portant sur un faible nombre d'années, la moyenne n'étant pas précise, nous n'avons pas cherché à effectuer de corrections. On retiendra simplement que les valeurs annuelles données correspondent probablement à une limite supérieure pour le FELOU et le NIANDAN.

#### VARIATIONS SAISONNIERES DE L'EVAPORATION

Elle ressort immédiatement du tableau n° III. Au Soudan, l'évaporation croît pendant toute la saison sèche en relation avec l'augmentation de la température. Elle atteint son maximum généralement en Avril: 11 à 12 mm par jour. (En 1952, le maximum était en Mai, par suite d'une saison des pluies tardive).

.../

Mais en général, l'humidité relative augmente nettement en Mai, entraînant une diminution de l'évaporation. Par la suite, cette réduction s'accroît pendant la saison des pluies et reste stationnaire en Juillet, Août et Septembre. Elle passe alors par un minimum de 2,5 mm. par jour. En Octobre, la saison des pluies s'achève et l'évaporation commence à augmenter, lentement cependant, car si l'humidité relative décroît assez rapidement, par contre, la température moyenne diminue depuis Octobre jusqu'en Décembre (5 à 6 mm/jour).

L'évolution est comparable sur les bords du SENEGAL avec cependant des valeurs d'évaporation plus fortes, non seulement en saison sèche, mais également en saison des pluies et un décalage, déjà signalé, correspondant à une saison des pluies plus tardive.

En HAUTE-GUINEE, sur le NIANDAN, on observe des évaporations de saison sèche nettement plus faibles qu'au SOUDAN. Les variations saisonnières sont sensiblement parallèles à celles du KENIE. Cependant la saison des pluies commence un mois plus tôt et se prolonge jusqu'en Novembre. L'écart entre évaporation de saison des pluies et évaporation de saison sèche est beaucoup plus faible qu'au SOUDAN, minimum mensuel : 2,5 mm/jour, maximum mensuel: 7 mm/jour.

D'autre part, fait qui n'apparaît pas sur ces moyennes mensuelles, l'évaporation en saison des pluies présente un caractère très différent suivant la latitude du fait de la nébulosité. En effet, dans le Nord du SOUDAN, un jour sans pluie d'Août ou de Septembre présente une évaporation notable assez analogue à celle mesurée certains jours de saison sèche, alors qu'en HAUTE-GUINEE, et à plus forte raison à KINDIA, les jours sans pluie, d'ailleurs rares, présentent une évaporation beaucoup plus faible qu'en saison sèche. Nous devons d'ailleurs signaler que les chiffres que nous donnons pour l'évaporation de saison des pluies à FOMI sont probablement un peu surestimés.

#### EVAPORATION JOURNALIERE

A titre indicatif, nous donnons, sur les graphiques n° 3 et 4, les variations des hauteurs d'eau évaporée pour un mois de saison sèche au site de KENIE et un mois de saison des pluies à KINDIA. On constate que la dispersion est beaucoup plus forte en saison des pluies qu'en saison sèche. En effet, à KENIE, l'évaporation varie de 5 mm. à 11 mm. A KINDIA, elle varie de 1,5 mm. à 7 mm. Encore n'avons nous pas tenu compte des jours de forte précipitation pour lesquels

..../

l'évaporation doit être inférieure aux plus faibles valeurs indiquées. Notons, d'autre part, que des valeurs supérieures aux plus fortes évaporations mentionnées ci-dessus ont été mesurées certains jours : par exemple 14 mm. à KENIE. Il a été vérifié que ces valeurs exceptionnelles correspondaient généralement à des déficits hygrométriques particulièrement forts, et non à des valeurs différentes du vent ou à des erreurs de lecture.

Nous signalons ce fait car l'examen des premières séries de relevés par des ingénieurs peu habitués à ce genre de mesures les conduit généralement à penser que ces observations sont fantaisistes et peut même les rebuter dans certains cas. Il est nécessaire, en raison de ces variations importantes de poursuivre les observations pendant une période de 15 jours au moins pour avoir une idée de l'évaporation moyenne pendant un mois donné.

#### EVAPORATION HORAIRE

Quelques observations ont été faites concernant les variations de l'évaporation au cours d'une même journée. Le graphique n° 2 correspond à des relevés faits toutes les deux heures; il donne une idée de ces variations. Les relevés ont été effectués en Mai à KINDIA. L'amplitude est très grande puisque l'évaporation varie de 0,05 mm/heure à la fin de la nuit à 0,55 mm/heure au milieu de la journée. L'évaporation nocturne est loin d'être négligeable.

#### DETERMINATION DE L'EVAPORATION A LA SURFACE D'UNE RETENUE

Les valeurs que nous avons indiquées correspondant à des cas bien déterminés.

Par exemple, un bac enterré au voisinage d'un certain thalweg, pour le FELOU, un bac flottant dans une mare à KENIE, un bac flottant en plein courant à FOMI sur le NIAN-DAN.

Il serait imprudent d'extrapoler les résultats ainsi trouvés, à des cas généraux, sans précautions spéciales. Nous voyons qu'en particulier au FELOU, pour deux bacs enterrés dans des conditions nettement différentes, les moyennes brutes de Juin donnaient, pour ces bacs distants de quelques centaines de mètres seulement, 7,8 et 9,6 mm. d'évaporation moyenne journalière. Précisons que les lectures étaient faites par le même observateur. Les variations d'un jour à l'autre pour ces deux bacs sont parfaitement cohérentes et concordent avec les mesures de température et d'humidité.

.../

Comme nous l'avons dit plus haut, le phénomène s'explique parfaitement par des situations différentes,  
- l'un des bacs étant au voisinage d'un thalweg qui, bien qu'à sec, donnait lieu à une certaine humidité, décelée par la mesure de f,  
- l'autre bac étant sur le plateau surchauffé.

De même, à FOMI, nous avons trouvé, pour le mois de Mai, des lectures brutes de 3,5 mm. pour le bac enterré et 5,6 mm. pour le bac flottant. Il s'agissait, comme nous l'avons expliqué plus haut, d'une différence d'exposition à la brise fluviale. Il n'est pas toujours possible de choisir exactement sur le terrain un emplacement de bac correspondant à des conditions normales. C'est pourquoi, nous pensons qu'il est prudent, chaque fois que l'on veut étudier un site d'utiliser au moins 4 à 5 bacs dans des positions différentes. Il est d'ailleurs possible, pour une étude serrée des variations locales des températures sèches et humides, de retrouver des conditions climatologiques "normales" et d'éliminer un ou deux bacs qui ne peuvent donner aucune indication utile pour le but recherché, par suite de leur situation "anormale". L'exemple des deux bacs enterrés du KENIE montre qu'en se plaçant dans des conditions climatologiques comparables on trouve des résultats très voisins, exemple en Mai : 10,3 et 9 mm.

Nous ne saurions trop recommander à cet effet de placer les bacs pendant la saison sèche dans le lit apparent des cours d'eau. On peut d'ailleurs parfaitement le faire dans les cours d'eau tropicaux sans que pour cela le fond du bac touche la nappe phréatique et soit influencé par des remontées capillaires venant de cette nappe phréatique. La grande amplitude des variations du plan d'eau des différents fleuves et rivières le permet. Dans ces conditions, le bac enterré sera soumis aux mêmes conditions d'humidité et de ventilation que les bacs flottants. Il est nécessaire cependant de disposer d'un bac enterré témoin car bien entendu au moment des crues le bac du lit apparent ne peut plus être observé.

Moyennant ces précautions, il semble que le coefficient de réduction entre bac flottant et bac enterré soit très faible. Nous avons vu que si l'on ne prenait pas les précautions indiquées, il est fort possible que des bacs enterrés donnent des résultats inférieurs à ceux des bacs flottants.

.../

Nos études ont porté sur des périodes de trop faibles durées pour pouvoir donner des indications générales sur la valeur des coefficients entre évaporation sur le bac flottant et évaporation sur le bac enterré. D'ailleurs, ce coefficient varie suivant la situation respective des deux bacs. Il semble qu'à KENIE, entre les bacs enterrés et les bacs flottants A et C, on puisse prévoir un coefficient de réduction de 95%. Les deux bacs étaient très voisins l'un de l'autre.

Il semble que pour un cours d'eau à régime très régulier on ait tout intérêt à utiliser des bacs flottants malgré une installation un peu plus laborieuse.

Il reste à déterminer le coefficient de réduction entre bac flottant et retenue. Nous espérons beaucoup de l'étude des mares. En fait, nos essais ne sont pas très probants. Il semble d'après ces essais, que l'évaporation trouvée dans un bac Colorado flottant soit sensiblement équivalente à l'évaporation dans une retenue de faible profondeur telle que la mare B du KENIE. Cependant, les variations de température superficielle de l'eau à l'intérieur du bac flottant ont une amplitude nettement plus grande que les variations de température à la surface de l'eau d'une mare, telle que la mare A et à plus forte raison une grande retenue. A cet effet, nous avons mesuré les températures maxima et minima de l'eau du NIGER pendant trois mois.

Nous avons groupé sur le graphique n° 5 les variations des températures de l'air ambiant, de l'eau dans le bac flottant C et de l'eau du NIGER pour une journée correspondant sensiblement aux conditions médianes des mois de Mars-Avril. Les amplitudes sont très différentes. Toutefois, si nous calculons l'évaporation par une formule type de DALTON avec un coefficient  $K$  correspondant aux valeurs que nous avons trouvées dans les études du KENIE, on constate que la réduction entre l'évaporation sur un bac flottant et l'évaporation dans une grande retenue est très peu différente. En effet, la réduction serait de l'ordre de 2%.

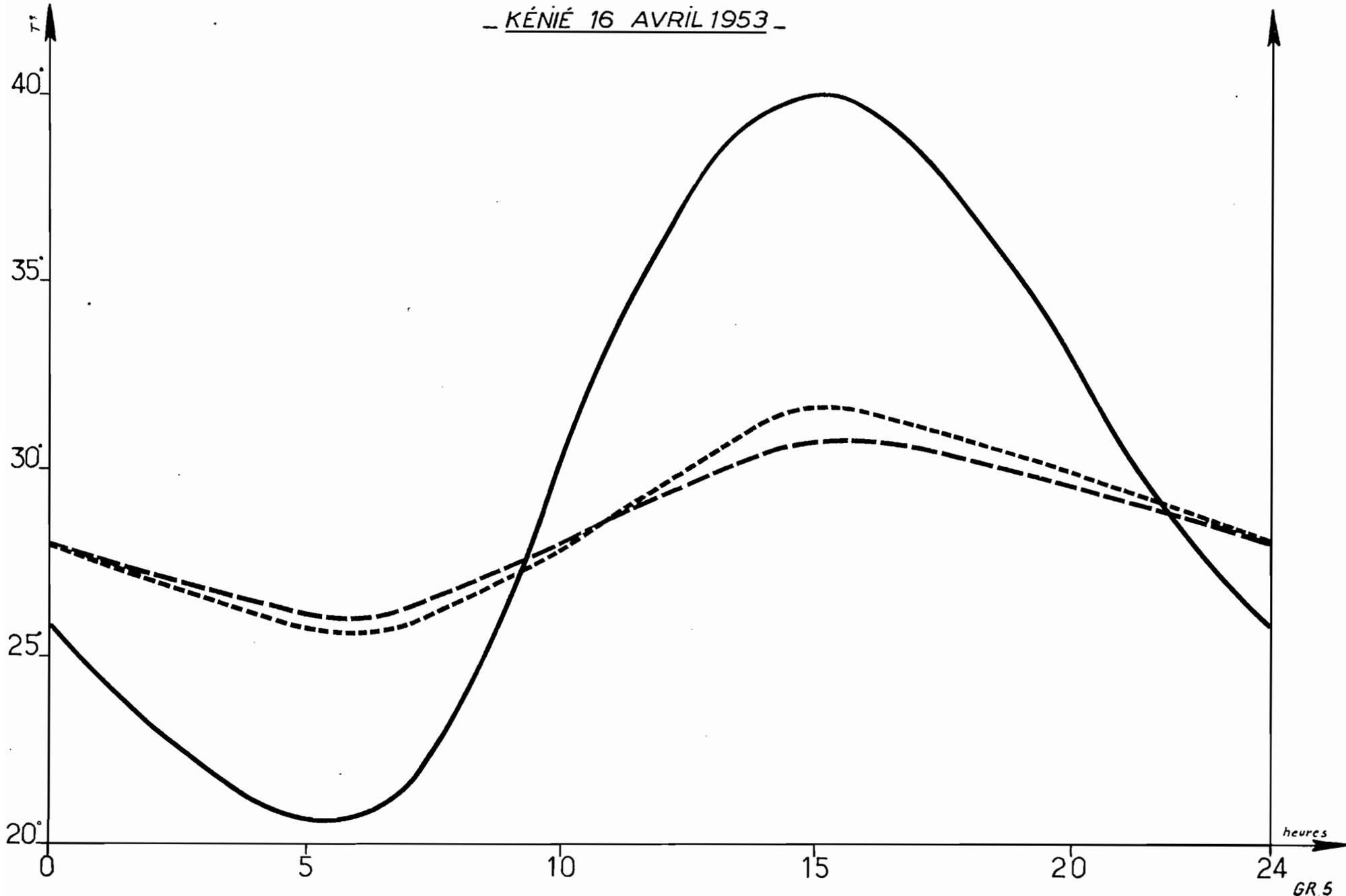
Mais n'oublions pas que si la valeur de  $F$  doit être à peu près exacte, il n'en est pas de même de la valeur de  $f$  déterminée pour un point voisin du bac enterré, donc déjà à une certaine distance d'une grande étendue d'eau telle que le NIGER. D'autre part, le vent qui parcourt la surface d'une grande retenue est beaucoup plus chargé d'humidité que le vent qui traverse une petite mare. Enfin, il nous a été difficile de reconstituer exactement les variations de température à partir du maximum et du minimum. Notre coefficient de réduction n'a donc pas une grande signification. Il correspond, selon toute vraisemblance, à un maximum.

.../

# VARIATIONS JOURNALIÈRES DE TEMPÉRATURE

- TEMPÉRATURE DE L'AIR —
- - - TEMPÉRATURE SUPERFICIELLE DE L'EAU DU NIGER —
- - - TEMPÉRATURE SUPERFICIELLE DE L'EAU DU BAC FLOTTANT C —

- KÉNIÉ 16 AVRIL 1953 -



Ce coefficient de réduction indique toutefois qu'entre les résultats d'un bac flottant et l'évaporation à la surface d'une retenue de plusieurs kilomètres de large on ne doit pas s'attendre à une réduction très grande. Il est probable que 75 à 80% par rapport aux résultats des bacs flottants seraient un minimum.

Nous pensons qu'il serait imprudent d'appliquer des coefficients de réduction de 80%, tels que ceux que l'on voit employer couramment.

A notre connaissance, les coefficients généralement mentionnés sont fondés sur une expérimentation bien légère et le plus souvent, ils sont appliqués à des bacs enterrés situés en dehors du lit apparent, ce qui explique parfaitement des valeurs aussi faibles.

### CONCLUSION

Les études incomplètes dont nous venons de donner les résultats ont confirmé les valeurs généralement admises pour l'évaporation en zone tropicale, soit entre 1,50 et 3 m. depuis la HAUTE-GUINEE jusqu'à la région soudanienne Nord. Ces valeurs sont valables pour des bacs flottants ou pour des conditions climatologiques très voisines de celles des bacs flottants. Les valeurs observées peuvent différer, dans une certaine mesure, pour les bacs enterrés suivant les conditions climatologiques surtout pour les mois à forte amplitude diurne.

Il est possible d'utiliser les données climatologiques fournies par les stations météorologiques moyennant des coefficients variables suivant les mois. La valeur de ces coefficients est à peu près équivalente pour les différents sites; cependant on doit noter de légers écarts tenant compte de la différence de situation entre bacs et stations météorologiques.

Des études ultérieures plus approfondies permettront de préciser les valeurs trouvées pour les sites déjà étudiés et de donner des indications sur des sites nouveaux. Il n'est pas exclu qu'après quelques années d'études, on puisse dresser une carte de l'évaporation sur des surfaces d'eau libres correspondant à des conditions d'expérimentation comparables. Cependant, il ne nous semble pas que ce soit là les études les plus urgentes. Nous savons fort peu de choses de la valeur des coefficients permettant de passer de l'évaporation à la surface d'un bac flottant, installé sur une nappe d'eau de faible profondeur, à l'évaporation telle qu'elle se produit dans une retenue de grande profondeur.

.../

On pourrait, dans ce but, soit faire des mesures réelles dans des réservoirs existants, mesures très délicates puisque la plupart des termes entrant dans le calcul ne sont pas connus avec une précision suffisante, soit étudier dans le détail tous les facteurs météorologiques existant à la surface d'une grande retenue et, en particulier, le vent et le degré hygrométrique.

C'est ce que l'Office de la Recherche Scientifique Outre-Mer se propose d'entreprendre. Malheureusement, ces études exigeront de longues années.