

L'évaporation des nappes d'eau libre L'exemple du Lac de Bam au Burkina-Faso

*1^{re} partie : échelles décadaire et
mensuelle*

Bernard POUYAUD ⁽¹⁾

RÉSUMÉ

L'évaporation d'une nappe d'eau libre est une caractéristique climatique qui intègre de multiples facteurs environnementaux, d'échelles spatiales et temporelles très étendues.

L'étude du Lac de Bam, situé au nord du Burkina-Faso, dans des conditions climatologiques présahéliennes (650 mm de pluie par an), a rassemblé de 1972 à 1976 autour d'une vaste étendue d'eau libre (20 km²), dont l'établissement du bilan hydrologique était possible sinon facile une grande partie de l'année, un équipement hydrométrique et météorologique susceptible de mesurer et d'enregistrer la plupart des facteurs déterminant l'évaporation.

Ainsi a-t-on pu vérifier, dans ce contexte, les approches classiques d'évaluation de l'évaporation et en proposer des améliorations mieux adaptées à cet environnement. Par diverses approches complémentaires, l'évaporation moyenne a pu être déterminée sur des pas de temps horaire, journalier, décadaire, mensuel et annuel.

Cet article synthétise les résultats obtenus, s'efforce d'analyser leur variabilité, précise les liaisons qui existent entre l'évaporation et ses facteurs conditionnels à diverses échelles de temps et à des époques de l'année représentatives, caractéristiques de l'évolution climatique saisonnière.

Pour des raisons de publication, ce papier est divisé en deux parties.

MOTS-CLÉS : Évaporation – Nappe d'eau libre – Sahel – Burkina – Gestion de réservoir.

ABSTRACT

EVAPORATION FROM A FREE WATER SURFACE. THE CASE OF LAKE BAM IN BURKINA-FASO – FIRST PART : TEN DAY OR MONTHLY TIME SCALES

The evaporation from a free water surface is a climatic characteristic which integrates various environmental factors on a wide scale in space and time.

Lake Bam, in the North of Burkina-Faso under climatological presahelian conditions (annual rainfall amounting to 650 mm), is a large body of open water (20 km²); its hydrological balance could be evaluated for most of the year, though not without difficulty; from 1972 to 1976, it was equipped with hydrometric and meteorological instruments to measure and record most of the factors determining evaporation.

Therefore, the classical approaches to the evaluation of evaporation could be tested under these conditions and new ones better adapted to the environment could be suggested. Mean evaporation could be measured through various complementary approaches for hourly, daily, ten day, monthly and annual step intervals.

This paper sums up the results obtained, tries to analyse their variability, specifies the relations between evaporation and its determinants at different time scales and at periods representative of the seasonal climate.

(1) Directeur de Recherche, Laboratoire Hydrologique ORSTOM, 2051, avenue du Val de Montferrand, BP 5045, 34032 Montpellier cedex.

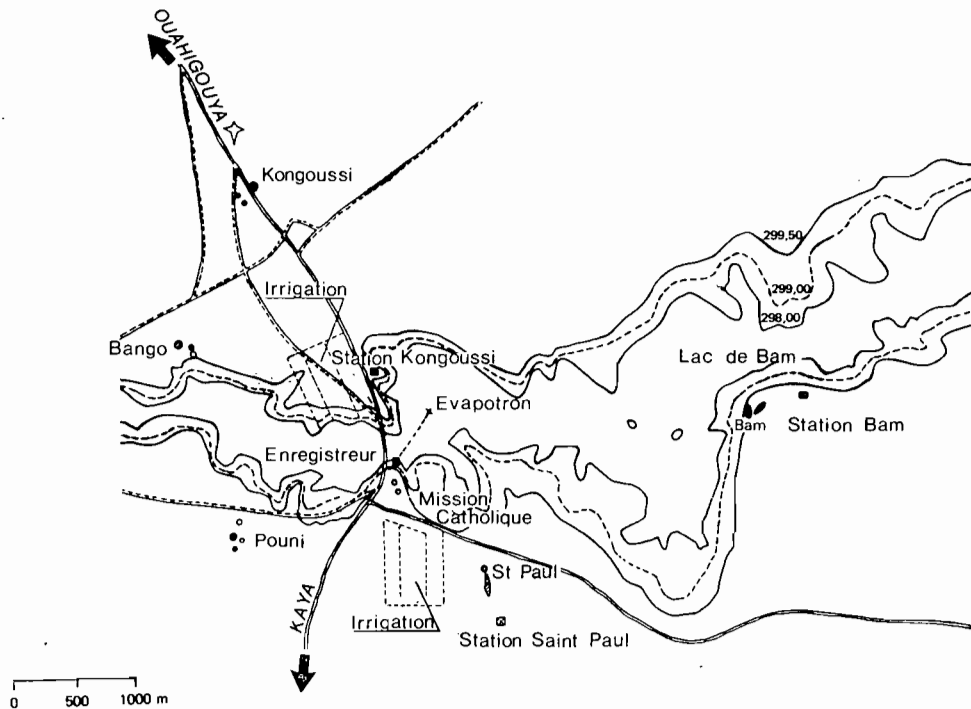


Fig. 1. - Étude du Lac de Bam. Détail des stations

(Dalton et dérivés). Une seconde partie est consacrée aux échelles journalière et infrajournalière de l'évaporation à travers l'établissement de bilans énergétiques pour des journées représentatives des périodes climatiques caractéristiques (saison sèche fraîche, saison sèche chaude, saison des pluies).

Pour respecter les contraintes de la publication, cet article est réparti en deux éditions successives.

L'évaporation des lacs et des grandes nappes d'eau libre a été abordée d'abord comme composante du bilan hydrique et il faudra attendre l'après deuxième guerre mondiale pour voir apparaître des approches diversifiées, s'appuyant, soit sur des formules aérodynamiques ou de transferts de masse à diverses échelles, plus ou moins directement inspirées de la formule de DALTON, soit sur une approche de type bilan énergétique ponctuel ou régional. U.S. Geological Survey a assuré en cette matière un rôle d'initiateur, avec des études sur le lac Hefner (KOHLER, 1954) et le lac Mead (HARBECK, 1958). Un peu plus tard, WEBB (1960) applique cette même approche au lac australien d'Eucumbene. Dès lors les équipes de chercheurs se multiplient, qui centrent leurs efforts sur certains lacs d'importance variable et avec donc des approches différentes. C'est le cas aux U.S.A., des nombreuses études consacrées aux « grands lacs » : Ontario, Huron, Érie, Supérieur... On peut citer, sans que la liste soit exhaustive, les travaux de SMITH (1973), BOLSENGA (1975), DERECKI (1976), QUINN (1979), etc. Le lac israélien de Tibériade est aussi le lieu d'études originales (STANHILL, 1969). En Hollande, plusieurs équipes se succèdent pour l'étude des polders et plus particulièrement du lac Flevo (KEIJMAN, KOUPMANS, 1973-WERINGA, 1971). Le lac australien d'Eucumbene, déjà cité, est aussi le siège de nouvelles études (HOY, STEPHENS, 1977), ainsi que le lac californien de Tahoe (MYRUP, 1979). L'originalité géographique de certains travaux mérite de les citer (lac du barrage d'Assouan sur le Nil : OMAR et BAKRY, 1980) ; lac Velen, RODHE, 1973 ; lac Tchad : travaux de l'ORSTOM, et EGGERS et TETZLAFF (1978).

Parmi ces études, certaines abordent des aspects très spécifiques de la théorie de l'évaporation, mais d'autres études sont entièrement consacrées à la physique de la basse atmosphère ou à l'approche aérodynamique, qui devait permettre ultérieurement le développement des méthodes modernes de mesure de l'évaporation. La publication de base est celle due à MONIN et OBUKHOV (1954), suivie notamment par BUSINGER (1971), DUNKEL et HASSE (1974), EDINGER (1970), GARRAT *et al.* (1973) HICKS (1975) etc. D'autres études se sont très tôt consacrées à

Certaines études traduisent par contre une approche plus générale et prétendent à des synthèses régionales telles celles de MORTON (1978, 1979) (qui s'appuient sur une représentation à grande échelle de l'évaporation conforme à l'approche de PRIESTLEY-TAYLOR (1972)), BOUCHET (1963) ou KOHLER et PARMELE (1967).

On assiste actuellement à la multiplication d'études consacrées à l'évaporation des surfaces d'eau libre, à partir de résultats méthodologiques acquis par les technologies et les méthodologies les plus modernes.

Il est une évidence que les conditions climatiques des zones tropicales et équatoriales exacerbent l'évaporation des nappes d'eau libre. Ainsi la connaissance précise de l'évaporation des grandes nappes d'eau, libres ou couvertes par la végétation aquatique, demeure en zone soudano-sahélienne un élément indispensable à l'élaboration des grands projets d'aménagements hydrauliques, que leur finalité soit agronomique, pastorale ou encore énergétique. Dans des vallées dont le relief le plus souvent très mou ne permet pas de construire des ouvrages à la profondeur suffisante, l'évaporation représente le paramètre hydrologique déterminant du bilan des retenues.

Le Service Hydrologique de l'ORSTOM s'est intéressé très tôt à l'étude de ces retenues, naturelles ou artificielles. Les travaux de BOUCHARDEAU (1957) sur le lac Tchad illustrent cette direction initiale des recherches du Service. Les travaux de RIOU (1972) concluaient un travail de plusieurs années, mené par des équipes multiples sur un transect Faya-Largeau, Bol, N'Djamena, Ba-Illi, Bebedja (au Tchad), Bangui (en R.C.A.) et Brazzaville (au Congo), sur le déterminisme de l'évaporation et de l'évapotranspiration en Afrique Centrale et Soudanienne. Mais il apparut rapidement indispensable de considérer des retenues de dimensions plus réduites où l'on escomptait obtenir des bilans hydrologiques plus précis et le choix se porta dès 1965 sur le lac de Bam situé au Burkina, par 13°20' de latitude nord, à environ 100 km au nord de la capitale Ouagadougou. Malgré les moyens importants qui furent dès le début consacrés à ce projet, il s'avéra rapidement qu'un bilan hydrologique précis n'était possible qu'à certaines périodes seulement de l'année.

L'étude préliminaire de IBIZA (1971) rendait compte des premières investigations entreprises sur le lac de Bam, en constatait les insuffisances et annonçait leur réorientation, qui se concrétisait par l'arrivée, courant 1972, d'une nouvelle équipe dotée de moyens mieux appropriés : un Évapotron, susceptible de mesurer et enregistrer les termes du bilan énergétique au-dessus du lac, était érigé au milieu d'un des plus importants bras du lac. Simultanément, une station météorologique très complète voyait le jour à 3 km à l'est du lac (en dehors du microclimat du lac), ensemble qui permettait la caractérisation des paramètres climatiques régionaux.

Hormis les facilités d'accès, et la relative proximité de Ouagadougou, le lac de Bam présente l'avantage d'autoriser une mesure directe de l'évaporation à partir de relevés limnimétriques plus de la moitié de l'année, si l'on excepte la saison des pluies (« l'hivernage ») de juin à septembre et, pour quelques années particulièrement pluvieuses, l'immédiat après hivernage (octobre-novembre). Durant cette période il est en effet difficile ou impossible de chiffrer avec une précision suffisante les apports directs ou par ruissellement. Ces travaux ont fait l'objet d'un travail de synthèse (POUYAUD, 1985) dont le présent article est issu.

L'ÉVAPORATION DU LAC DE BAM AUX ÉCHELLES DÉCADAIRE ET MENSUELLE

Le pas de temps concerné (de la semaine au mois) est celui obtenu classiquement pour décrire des caractéristiques climatiques à variabilité saisonnière, même si l'unité utilisée pour exprimer l'évaporation moyenne décadaire ou mensuelle reste le millimètre d'évaporation par jour. Sur de telles périodes, on peut en effet considérer que l'évaporation journalière reste homogène, ce qui justifie l'établissement de valeurs moyennes représentatives de l'évaporation. L'expérience montre d'ailleurs que la variabilité interannuelle de ces évaporations décadaires et mensuelles reste faible dans ces conditions climatiques, au moins pour les mois de saison bien établie et à l'exclusion donc des mois de transition.

Selon le type de l'approche utilisée, deux cas sont possibles :

- elle fournit une valeur globale précise de l'évaporation sur la période considérée, et ne décrit donc pas ses variations aux pas de temps inférieurs (bilan hydrologique) ;
- elle fournit au contraire une bonne description de l'évolution de l'évaporation, mais ne peut la fournir sur le pas de temps considéré qu'à un coefficient de calage près (approche énergétique et estimation corrélatives).

Ces deux types d'approches sont évidemment complémentaires (le premier sert au calage du second) et répondent aux exigences diverses des utilisateurs.

1. LE BILAN HYDROLOGIQUE

L'équation de base du bilan hydrique s'exprime classiquement, pour un pas de temps Δt , sous la forme :

$$(P - E) A + Q_a - Q_p = \Delta S$$

où P et E sont la pluie et l'évaporation sur l'aire A de la nappe évaporante durant Δt , Q_a et Q_p les autres apports et pertes durant la même période, enfin ΔS , la variation du stock d'eau.

Certains de ces éléments sont exprimés sous forme de hauteurs d'eau, d'autres sous forme de volumes, la courbe de remplissage du lac permettant de passer des uns aux autres.

Il n'est pas de notre propos de décrire ici les incertitudes sur chacun des termes de ce bilan hydrologique, qui sont très variables en cours d'année et d'une année à l'autre, que ces incertitudes résultent de problèmes méthodologiques (précision de la mesure des hauteurs limnimétriques ou des hauteurs moyennes de précipitations) ou de notre incapacité à évaluer certains d'entre eux (infiltration ou apports latéraux de ruissellement).

Aussi présentons-nous uniquement un tableau récapitulatif (tabl. I) des évaporations mensuelles évaluées par bilan hydrologique pour les deux périodes 1966-1970 et 1971-1976.

TABLEAU I
Évaporations mensuelles du Lac de Bam obtenues par bilan hydrologique en mm.jour⁻¹

Date	Jan.	Fév.	M.	Av.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	ANNEE
1966								(5,2)	(4,8)	(5,5)	6,5	5,6	
1967	6,1	6,4	6,6	7,5	7,6	7,5	7,2	(5,1)	(5,7)	6,8	6,5	5,0	6,50
1968	5,4	6,5	6,8	7,1	7,6	6,0	5,6	(6,2)	5,5	5,8	5,6	5,0	6,09
1969	5,1	6,1	7,2	9,0	9,4	8,1	6,8	(5,0)	(5,2)	6,2	6,7	5,5	6,69
1970	5,6	6,3	7,2	7,6	7,5	8,1	6,0	(5,1)	6,0	6,2	6,2	4,4	6,35
1971	5,2	5,6	6,2	7,7	8,4	(8,0)	(6,8)	-	-	-	(7,2)(i)	6,4	(6,48)
1972	5,7	6,7	8,1	7,0	7,4	6,3	6,1	(5,4)	-	(7,2)(i)	6,7	5,6	(6,43)
1973	6,1	6,5	6,8	6,8	(8,1)	(7,3)	(7,4)	-	-	(7,2)(i)	(7,5)(i)	5,5	(6,58)
1974	6,3	6,7	6,8	8,0	8,1	7,7	(6,4)	-	-	(6,9)(i)	(7,2)(i)	(5,9)(i)	(6,67)
1975	6,0	6,3	7,1	8,3	7,6	7,3	(6,6)	-	-	(6,5)(i)	6,2	5,9	(6,54)
1976	5,7	6,4	7,8	7,3	(6,8)	(8,0)	(6,8)	(4,5)	(5,0)	(6,3)(i)	6,5	5,8	(6,41)
Moyen													
1966-1970	5,7	6,3	7,0	7,6	7,8	7,4	6,6	5,2	5,2	6,3	6,4	5,5	6,42
1971-1976													

Les valeurs indiquées entre parenthèses traduisent une large imprécision du bilan causée par des pluies accompagnées ou non de ruissellements. Les tirets des mois de plein hivernage correspondent à des valeurs non calculées de l'évaporation par suite d'importants apports non évalués du réseau hydrographique. La lettre (i), qui suit certaines valeurs mensuelles de l'évaporation, indique qu'elles sont certainement entachées d'erreurs par excès, dues aux infiltrations imparfaitement prises en compte. Les valeurs moyennes annuelles de l'évaporation sont obtenues en remplaçant les valeurs mensuelles manquantes par une estimation faite à partir des valeurs moyennes mensuelles obtenues lors de la période 1966-1970 plus favorable à l'élaboration de bilans, ou en évaluant dans les cas d'infiltration une valeur vraisemblable de l'évaporation réelle du mois en cause. Les valeurs mensuelles interannuelles moyennes ont été calculées sur les seules valeurs « sûres ».

Ce tableau contient donc les moyennes mensuelles « de référence » de l'évaporation. On sera ultérieurement amené à utiliser des évaporations moyennes sur des décades obtenues de la même façon, afin de les utiliser comme références d'autres approches.

Les moyennes interannuelles 1966-1970 et 1971-1976 sont indiquées sur la figure 2.

2. APPROCHES CORRÉLATIVES DE L'ÉVAPORATION MENSUELLE DU LAC VIS-A-VIS DE PARAMÈTRES CLIMATIQUES SIMPLES

Les évaporations mensuelles réputées connues par leur estimation précédente à partir de bilans hydrologiques, il est intéressant de les corrélérer à des grandeurs climatiques simples : températures et rayonnements. Nous avons rassemblé dans le tableau II les valeurs interannuelles de différents paramètres observés à la station climatologique voisine de Saint-Paul, représentative du climat régional :

ELAC : évaporation moyenne estimée par bilan hydrologique ;

TABRI : température moyenne sous abri ;

TMAX : moyenne des températures journalières maximales ;

RG : rayonnement global moyen.

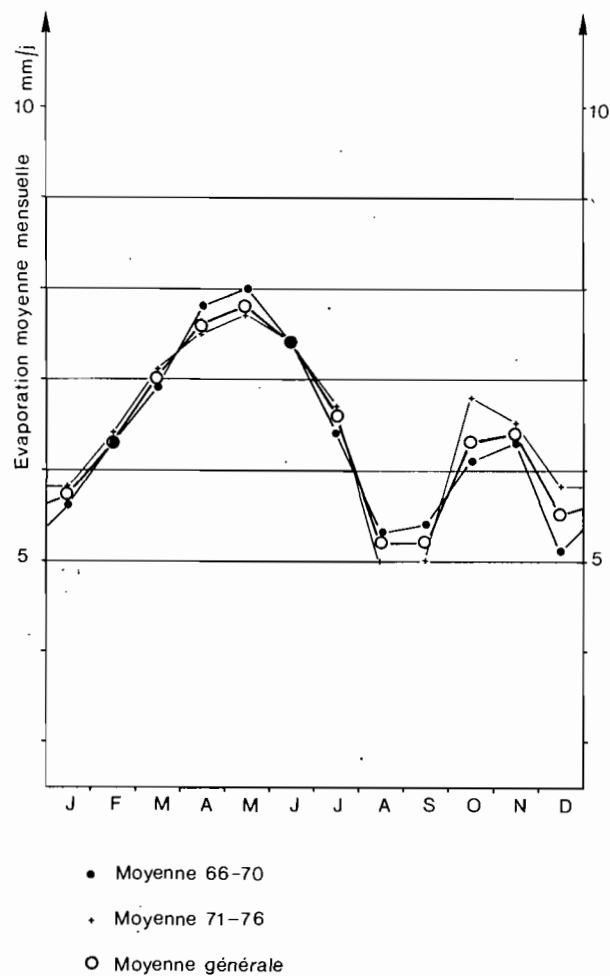


Fig. 2. - Évaporations mensuelles mesurées. Moyennes interannuelles

TABLEAU II
 Évaporation et paramètres climatiques mensuels en moyenne interannuelle

Mois	ELAC mm.j-1	TABRI °C	TMAX °C	RG mm.j-1	$\frac{ELAC}{RG}$
Jan.	5,7	22,3	31,8	8,6	0,66
Fév.	6,3	25,6	34,5	9,9	0,64
Mars	7,0	29,7	37,4	10,1	0,69
Avril	7,6	32,5	39,6	10,5	0,72
Mai	7,8	32,4	38,5	10,7	0,73
Juin	7,4	30,7	36,6	10,7	0,69
Juil.	6,6	27,6	32,3	9,8	0,67
Août	5,2	26,8	31,6	9,8	0,53
Sept.	5,2	27,3	32,5	9,8	0,53
Oct.	6,3	28,8	36,1	9,7	0,65
Nov.	6,4	25,7	35,3	9,4	0,68
Déc.	5,5	23,2	32,6	8,5	0,64
	6,42	27,7	34,8	9,8	0,66

Les corrélations obtenues se révèlent relativement peu satisfaisantes pour la totalité de l'année, car les liaisons entre les éléments du climat présentent ici un caractère saisonnier bien marqué.

Certes la relation entre évaporation et température ou entre évaporation et rayonnement global est intuitive et les corrélations obtenues avec les 12 moyennes mensuelles interannuelles sont les suivantes :

$$\text{ELAC} = 0,220.\text{TABRI} + 0,315 \quad r = 0,80$$

$$\text{ELAC} = 0,289.\text{TMAX} - 3,67 \quad r = 0,88$$

Les couples de points (ELAC, TABRI) et (ELAC, TMAX) sont reportés sur la figure 3.

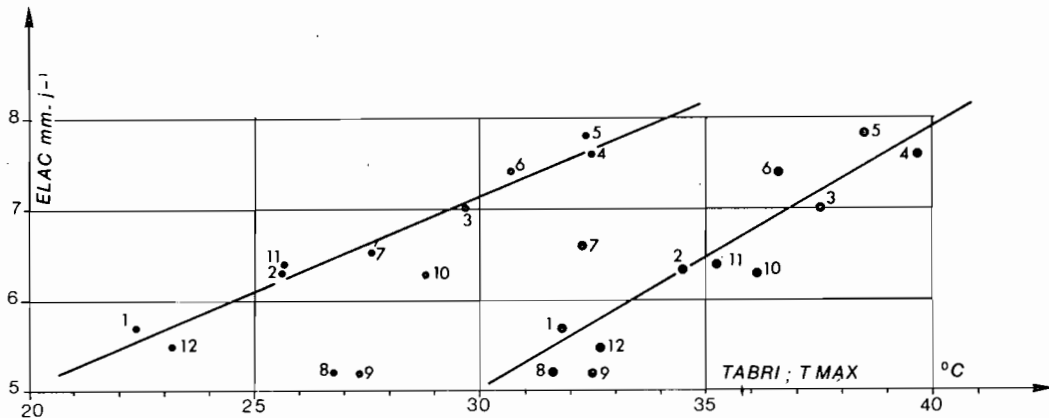


Fig. 3. - Lac de Bam. Station Saint-Paul

Ces résultats sont globalement améliorés si l'on exclut pour les TABRI les mois de plein hivernage de août et septembre, et pour les TMAX les mois de fin de saison sèche chaude de mai, juin et juillet.

$$\text{ELAC} = 0,206.\text{TABRI} + 0,930$$

$$r = 0,95 ;$$

10 mois sans août et septembre

$$\text{ELAC} = 0,286.\text{TMAX} - 3,77$$

$$r = 0,96 ;$$

9 mois sans mai, juin et juillet

Ces résultats sont voisins de ceux trouvés par RIOU (1972) pour l'ETP à N'Djamena et Bol-Matafo.

Les corrélations obtenues avec le rayonnement global, excluant les mois d'août et septembre, sont aussi satisfaisantes :

$$\text{ELAC} = 0,970.\text{RG} - 2,84$$

$$r = 0,95 ;$$

10 mois sans août et septembre

Les couples de points (ELAC, RG) sont reportés sur la figure 4.

L'examen du rapport ELAC/RG est très significatif puisque sa moyenne annuelle (0,66) est celle annoncée dans des situations climatiques comparables (RIOU, 1972). L'évolution saisonnière du rapport ELAC/RG (maximum en fin de saison sèche - minimum en août-septembre) donne de premières indications sur l'advection régionale.

3. CORRÉLATIONS ENTRE LES ÉVAPORATIONS MENSUELLES DU LAC DE BAM ET LES OBSERVATIONS SUR BACS D'ÉVAPORATION

Les corrélations directes entre évaporation sur le lac et paramètres climatiques simples ne fournissent pas de résultats satisfaisants dans toutes les circonstances et il peut être intéressant d'utiliser une approche complémentaire en exploitant les observations sur bacs, utilisées traditionnellement pour estimer l'évaporation de grandes nappes d'eau libres.

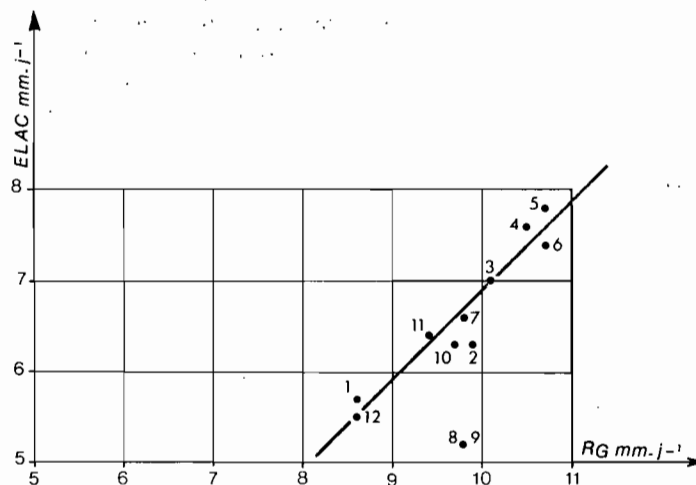


Fig. 4. - Lac de Bam. Station Saint-Paul

Deux types de bacs coexistent : le bac enterré de type Colorado, classiquement utilisé par l'hydrologue, et le bac classe A, plus fréquemment exploité en réseau par les météorologues. Ces bacs peuvent être ou non entourés par un anneau de garde évaporant constitué d'une pelouse irriguée. Dans l'étude du Lac de Bam, trois situations climatiques ont pu être testées, correspondant à trois stations climatologiques, respectivement non perturbées par la proximité du lac (Saint-Paul), à proximité et « sous le vent » du lac (Kongoussi), à « l'amont du vent du lac »

TABLEAU III
Rapport entre les évaporations du lac et celles mesurées sur bacs.
Valeurs mensuelles et annuelles en moyenne interannuelle

	SAINT PAUL			KONGOUSSI	BAM
	$\frac{ELAC}{ESN}$	$\frac{ELAC}{EPEL}$	$\frac{ELAC}{ECLA}$	$\frac{ELAC}{ESN}$	$\frac{ELAC}{ESN}$
1973	0,71	-	-	0,85	0,78
1974	0,71	-	0,66	(0,78)	0,80
1975	0,73	0,91	0,71	(0,77)	0,88
1976	0,76	0,88	0,73	-	-
Moy.	0,73	0,91	0,70	0,84	0,82
Jan.	0,71	0,95	0,67	-	-
Fév.	0,68	0,94	0,62	-	-
Mars	0,65	0,86	0,59	-	-
Avr.	0,64	0,74	0,59	-	-
Mai	0,66	0,80	0,65	-	-
Juin	0,69	0,80	0,67	-	-
Juil.	0,89	1,16	0,92	-	-
Août	0,79	0,93	0,74	-	-
Sept.	0,76	0,91	0,74	-	-
Oct.	0,75	0,98	0,76	-	-
Nov.	0,73	0,94	0,70	-	-
Déc.	0,72	0,88	0,68	-	-
Moy.	0,71	0,89	0,68	-	-

mais proche de lui (Bam). La comparaison des résultats montre bien l'influence du lac sur les évaporations « bacs » rassemblées dans le tableau III par le biais des « coefficients de bac » ELAC/EBAC :

ESN : est l'évaporation sur le bac colorado entouré de sol nu

EPEL : est l'évaporation sur le bac colorado entouré de pelouse irriguée

ECLA : est l'évaporation sur le bac classe A entouré de sol nu

On peut voir que le rapport ELAC/ESN annuel passe de 0,73 à Saint-Paul, à 0,82 à Bam et 0,84 à Kongoussi. Ces résultats mettent en évidence une advection nettement plus sensible à Saint-Paul qu'aux stations de Bam et de Kongoussi influencées par la proximité du lac. Ce rapport ELAC/ESN est relativement variable d'un mois à l'autre puisqu'il dépasse 0,80 en saison des pluies et descend à moins de 0,65 en saison sèche. Les valeurs obtenues au Lac Tchad (0,68 pour le rapport moyen interannuel) sont légèrement inférieures à celles du Lac de Bam, et présentent des variations mensuelles comparables (RIOU, 1972).

Les rapports ELAC/ECLA sont systématiquement inférieurs à ceux de ELAC/ESN avec une répartition mensuelle comparable. Ce rapport, qui est de 0,68 pour le Lac de Bam, passe à 0,59 pour le Lac Tchad, en relation bien sûr avec les grandeurs respectives des nappes évaporantes concernées.

Ces résultats ont donc été obtenus à partir des 12 valeurs mensuelles interannuelles, mais une étude corrélative est aussi possible à partir de toutes les valeurs mensuelles des mois où l'évaporation du lac peut être déterminé par bilan hydrologique, ce qui exclut malheureusement presque tous les mois de saison des pluies.

La corrélation ELAC-ESN s'appuie sur 25 couples de valeurs des années 72 à 76 :

$$\text{ELAC} = 1,76 \cdot \text{ESN}^{0,59} \quad r = 0,94$$

et la corrélation ELAC-ECLA sur 21 couples :

$$\text{ELAC} = 1,66 \cdot \text{ECLA}^{0,60} \quad r = 0,94$$

Les couples de points (ELAC, ESN) et (ELAC, ECLA) sont reportés sur les figures 5 et 6.

Ces relations, données à titre indicatif, montrent qu'il est possible, pour chaque situation climatique, de définir des relations permettant d'évaluer l'évaporation d'une nappe d'eau libre à partir d'observations sur bac faites en stations climatologiques classiques, à condition d'évaluer les coefficients de passages adaptés, fonctions de la superficie de la nappe d'eau évaporante et du climat régional.

4. APPROCHE ÉNERGÉTIQUE DE L'ÉVAPORATION D'UNE NAPPE D'EAU LIBRE, A L'ÉCHELLE MENSUELLE

Cette approche repose sur le bilan énergétique de la nappe d'eau évaporante, qui peut être réalisé globalement à l'échelle de l'ensemble du lac ou rapporté à une part élémentaire de l'interface évaporante. Dans ce dernier cas, on écrit classiquement ce bilan énergétique :

$$R_N + L_e \cdot E + H + G + A = \delta W / \delta t$$

où :

- R_N est le rayonnement net, somme algébrique de diverses composantes, dans le visible (R_G : rayonnement global et $R_r = a \cdot R_G$: rayonnement réfléchi avec a : albedo) et dans les grandes longueurs d'onde (R_a : rayonnement atmosphérique et $R \uparrow$: rayonnement terrestre).

- $L_e \cdot E$ est la chaleur latente consacrée à l'évaporation E .

- H , la chaleur sensible cédée à la basse atmosphère.

- G , le flux de chaleur transmis à l'eau qui, dans le cas d'une surface aquatique, intègre non seulement la composante conduction mais aussi les composantes convective et radiative.

- A , les énergies advectives de toutes provenances.

- $\delta W / \delta t$, la variation d'énergie stockée par le système.

A l'échelle de l'année on peut en général écrire : $Q_n = L_e \cdot E + H$

A partir de ce bilan et au prix de quelques hypothèses simplificatrices, PENMAN propose :

$$E_{PEN} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot Q_{ne} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot E_a$$

où :

- Δ est la pente de la courbe de la pression de vapeur saturante en fonction de la température pour la température moyenne de l'air T_a à un niveau de référence.

- γ la constante psychrométrique = $0,67 \text{ mb} \cdot \text{°K}^{-1}$

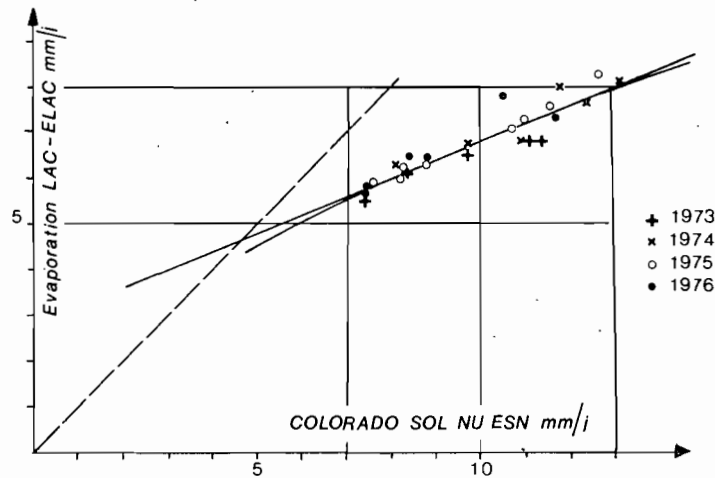


Fig. 5. - Corrélations évaporation lac et Colorado à Saint-Paul

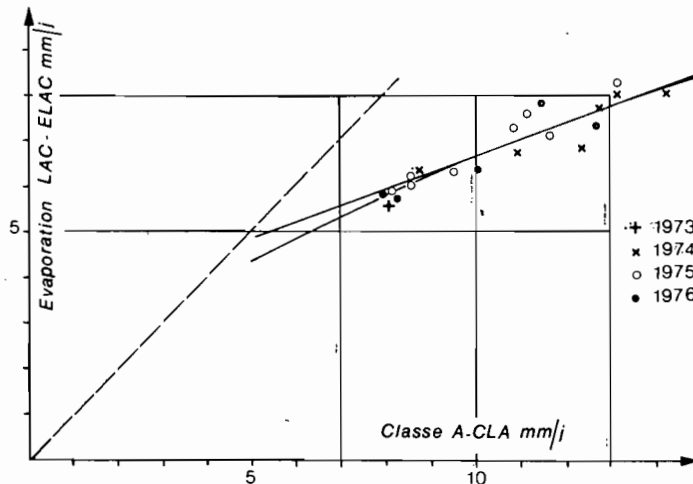


Fig. 6. - Corrélations évaporation lac et classe A à Saint-Paul

- Q_{ne} , l'énergie utilisable définie précédemment, $R_N + G + A$, si $\delta W/\delta t$ est estimée négligeable sur le pas de temps de référence, ce qui est à peu près le cas à l'échelle de la journée et en tout cas aux pas de temps supérieurs.
- E_a , un « pouvoir asséchant » de l'air estimé par $E_a = f(u) \cdot (e_a^* - e_a)$ où $f(u)$ est une fonction du vent, e_a , la pression partielle de vapeur de l'air au niveau de référence et e_a^* la pression de vapeur saturante pour la température ambiante T_a .

Pour ce qui nous concerne, nous avons considéré que sur les périodes mensuelles considérées, l'énergie utilisable Q_{ne} était égale à R_N , estimant que G et A étaient négligeables pour un laps de temps mensuel.

R_N est estimé par la formule :

$$R_N = (1 - a)R_G - \sigma \cdot TABRI^4 \left(0,40 - 0,05 \sqrt{E_2 ABRI} \right) \left(0,5 + 0,5 \cdot \frac{S}{S_0} \right)$$

proposée par RIOU pour N'Djamena et vérifiée dans le cas du Lac de Bam, où :

- a est l'albédo, égal à 0,05 pour de l'eau propre, mais qui peut atteindre 0,10 à 0,15 avec les eaux chargées d'argile de l'hivernage.

- R_G , le rayonnement global, rattaché à la durée d'insolation S par une relation linéaire :

$$R_G = G_0 (0,56 \cdot S/S_0 + 0,25)$$

- TABRI, la température moyenne sous abri, en °K.
- σ , la constante de STEFAN-BOLTZMANN que l'on prend égale à : $4,92 \cdot 10^{-7} \text{ J.cm}^{-2} \cdot \text{°K}^4 \cdot \text{j}^{-1}$.
- E2 ABRI, la moyenne de la pression partielle de vapeur d'eau sous abri exprimée en mb.
- S/S_0 , le rapport de la durée d'insolation à la durée du jour.

Les calculs ont été menés avec diverses valeurs de l'albédo a , de 0,05 à 0,20, couvrant l'éventail des valeurs possibles pour la surface évaporante du Lac de Bam.

La fonction de vent $f(u)$, utilisée dans la définition du pouvoir évaporant de l'air E_a , est celle établie par la corrélation statistique obtenue avec les données du bac Colorado sol nu de la station climatologique Saint-Paul.

$$f(u) = 0,311 (1 + 0,304 \cdot U2ABRI)$$

où U2ABRI est la vitesse du vent à 2 m à Saint-Paul.

Les résultats concernent à la fois les mois des années 1973 à 1976 et les 12 valeurs mensuelles interannuelles obtenues à partir de cette période.

Le premier terme de l'évaporation de PENMAN, qui est classiquement défini comme « l'évaporation à l'équilibre »,

$$EEQU = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_{ne}$$

ainsi que l'évaporation de PRIESTLEY et TAYLOR

$$EPRT = a_e \cdot EEQU \text{ (avec } a_e = 1,26)$$

sont également calculés pour les mêmes périodes.

Nous fournissons au tableau IV, les seules valeurs interannuelles de ces résultats qu'il nous est loisible de discuter maintenant.

4.1. Évaporation à l'équilibre EEQU

Les résultats montrent que l'évaporation à l'équilibre reste systématiquement inférieure aux évaporations évaluées par bilan hydrologique, ce qui est conforme à ce que nous savons des conditions advectives constantes qui caractérisent l'environnement climatique du Lac de Bam.

Il est toutefois satisfaisant de constater que les estimations par bilan hydrologique des évaporations moyennes interannuelles des mois d'août et septembre sont proches des valeurs calculées de EEQU pour un albédo $a = 0,10$, en moyenne représentatif des eaux sales de cette période de l'année ; durant les mois de plein hivernage, il est de fait normal de se trouver approximativement dans des conditions peu advectives et d'humidité régionale importante, propres à valider le concept « d'évaporation à l'équilibre ».

4.2. Évaporation de PRIESTLEY-TAYLOR

Les valeurs de EPRT sont calculées avec une valeur constante de a_e égale à 1,26. On a vu que l'évaporation moyenne interannuelle du Lac de Bam est d'environ 6,4 mm.j-l que l'on peut comparer aux valeurs de EPRT respectivement égales à 6,3 mm.j-l pour un albédo de 0,05 et 5,8 mm.j-l pour un albédo de 0,10, c'est-à-dire, environ 6,0 mm.j-l pour un albédo de 0,08 sans doute représentatif des conditions annuelles moyennes du Lac de Bam.

La formule de PRIESTLEY-TAYLOR sous-estime donc d'environ 0,5 mm.j-l l'évaporation réelle du Lac de Bam avec un coefficient $a_e = 1,26$. L'erreur relative est d'environ 10 % et d'après nos données interannuelles, la bonne « constante » de PRIESTLEY-TAYLOR du Lac de Bam serait :

$$a_e = 1,34$$

Cette sous-estimation (avec $a_e = 1,26$) provient de la non-prise en compte par les hypothèses de PRIESTLEY des phénomènes d'advection, d'autant plus importants ici que la surface du Lac de Bam est relativement faible (sa largeur est de plus dans l'axe des vents dominants du N.E.) et que les différences de température et d'humidité entre la surface du lac et les surfaces environnantes sont plus grandes.

TABLEAU IV

Calcul des valeurs mensuelles interannuelles de EPEN, EEQU et EPRT pour 4 valeurs de l'albédo α

	TABRI	E2ABRI	U2ABRI	S/So	RG	E _a	$\frac{Y}{\Delta \cdot Y} \cdot E_a$	$\alpha = 0,05$				$\alpha = 0,10$				$\alpha = 0,15$				$\alpha = 0,20$				ELAC	
								Rn	EEQU	EPRT	EPEN	Rn	EEQU	EPRT	EPEN	Rn	EEQU	EPRT	EPEN	Rn	EEQU	EPRT	EPEN		
Interannuel	J	22,3	7,3	1,45	0,82	2091	8,8	2,51	1085	3,20	4,03	5,71	980	2,89	3,65	5,40	876	2,58	3,26	5,09	771	2,28	2,87	4,78	5,7
	F	25,6	8,0	1,41	0,87	2398	11,0	2,75	1333	4,13	5,21	6,88	1213	3,76	4,74	6,51	1093	3,39	4,27	6,14	973	3,02	3,80	5,77	6,3
	M	29,7	10,4	1,54	0,77	2446	14,3	3,02	1451	4,73	5,96	7,75	1329	4,33	5,46	7,35	1206	3,93	4,95	6,95	1084	3,53	4,45	6,55	7,0
	A	32,5	14,2	1,69	0,74	2533	16,4	3,09	1617	5,42	6,83	8,51	1491	5,00	6,30	8,09	1364	4,57	5,76	7,66	1237	4,15	5,23	7,24	7,6
	M	32,4	20,6	2,19	0,74	2596	14,5	2,76	1822	6,10	7,69	8,86	1692	5,67	7,14	8,43	1563	5,23	6,59	7,99	1433	4,80	6,04	7,56	7,8
	J	30,7	23,0	2,39	0,73	2580	11,4	2,31	1871	6,16	7,76	8,47	1742	5,74	7,23	8,04	1613	5,31	6,69	7,62	1484	4,89	6,16	7,20	7,4
	J	27,6	25,1	1,91	0,63	2361	5,8	1,33	1753	5,58	7,03	6,91	1635	5,20	6,55	6,54	1517	4,83	6,08	6,16	1399	4,45	5,61	5,79	6,6
	A	26,8	26,3	1,56	0,65	2366	4,1	0,97	1777	5,60	7,05	6,57	1659	5,22	6,58	6,20	1540	4,85	6,11	5,82	1422	4,48	5,64	5,45	5,2
	S	27,3	26,2	1,36	0,70	2375	4,4	1,03	1767	5,60	7,05	6,63	1648	5,22	6,58	6,25	1529	4,85	6,11	5,88	1410	4,47	5,63	5,50	5,2
	O	28,8	21,4	1,08	0,78	2340	7,5	1,64	1610	5,20	6,55	6,84	1493	4,82	6,07	6,46	1376	4,44	5,60	6,09	1259	4,06	5,12	5,71	6,3
	N	25,7	11,7	1,15	0,87	2269	8,9	2,22	1317	4,09	5,15	6,31	1204	3,74	4,71	5,96	1090	3,38	4,26	5,61	977	3,03	3,82	5,25	6,4
	D	23,2	8,7	1,21	0,85	2071	8,4	2,31	1083	3,24	4,09	5,55	980	2,93	3,69	5,24	876	2,62	3,30	4,93	772	2,31	2,91	4,62	5,5
M	27,7	16,9	1,58	0,76	2378	9,3	2,14	1571	5,00	6,30	7,14	1452	4,62	5,83	6,76	1333	4,25	5,35	6,40	1214	3,87	4,87	6,00	6,42	

pour $T = T_a$
 erreur qui peut intervenir sur le coefficient

$$\frac{y}{\Delta + y}$$

de E_a lorsque T_s est nettement différent de T_a

Les coefficients $\Delta/\Delta + y$ et $y/\Delta + y$ sont de nature barycentrique, justifiée par l'approche de PENMAN qui leur octroie leur signification physique :

Le premier ($\Delta/\Delta + y$) est indiscutable puisqu'il correspond au minimum d'évaporation, pour une énergie disponible donnée Q_{ne} , qui est par définition

$$EEQU = \frac{\Delta}{\Delta + y} \cdot Q_{ne}$$

Le second ($y/\Delta + y$) est associé au pouvoir évaporant de l'air

$E_a = f(U2ABRI)$. (EWABRI-E2ABRI), dont seule la composante « déficit de saturation » est relativement bien définie, la fonction de vent $f(u)$ étant beaucoup plus difficile à évaluer. La représentativité de la fonction vent est en effet discutable, quelle que soit la forme retenue.

Aussi est-il intéressant d'écrire le terme advectif en introduisant un terme correctif, λ , coefficient multiplicatif qui permet un ajustement entre les valeurs mensuelles ELAC observées et celles correspondantes calculées par PENMAN modifié qui devient :

$$EPEN_m = \frac{\Delta}{\Delta + y} \cdot Q_{ne} + \lambda \cdot \frac{y}{\Delta + y} E_a$$

Les valeurs de λ ainsi calculées figurent au tableau VI.

Ces résultats sont très significatifs :

- A l'échelle annuelle, la part du terme advectif devrait donc être réduite dans un rapport 0,76. RIOU (1972) avait trouvé pour le Lac Tchad $\lambda = 0,59$, ce qui est donc cohérent avec nos résultats si l'on tient compte des dimensions beaucoup plus vastes du Lac Tchad (du moins en période « humide »).

- Les mois d'août et septembre ont un λ négatif qu'explique le choix d'un albédo $a = 0,08$, insuffisant pour les mois d'hivernage, qui conduit à une trop forte valeur de EPEN. Un albédo, voisin de 0,10 à 0,12, conduirait à des valeurs de λ positives, mais minimales, significatives de la faible importance de l'advection en hivernage, ce que traduisaient déjà les valeurs proches de 1,0 du coefficient de PRIESTLEY-TAYLOR des mois d'août et septembre.

- Au contraire, durant la saison sèche fraîche, λ reste supérieur à 1, témoignant ainsi d'une advection importante caractéristique de ces mois très secs et très venteux (novembre à février).

- Dès la saison sèche chaude et humide λ redevient inférieur à 1 : la formule de PENMAN surestime donc, pour ces mois aussi, l'évaporation des grandes nappes d'eau libre.

Les valeurs de EPEN et de ses composants E_a et RN figurent sur la figure 8.

5. L'APPROCHE PAR LES TRANSFERTS GLOBAUX AÉRODYNAMIQUES DE L'ÉVAPORATION DES NAPPES D'EAU LIBRE A L'ÉCHELLE MENSUELLE

La théorie des transferts de flux turbulents conduit, dans le cas d'une nappe évaporante, à l'expression :

$$E = C_e \cdot \rho \cdot \bar{u}_r (\bar{q}_s - \bar{q}_r)$$

où, pour un pas de temps donné, \bar{u}_r et \bar{q}_r sont les moyennes de la vitesse de vent et de l'humidité de l'air surplombant le lac à un niveau de référence, \bar{q}_s la moyenne de l'humidité saturante à l'interface et C_e un coefficient de transfert, qui est une constante si l'instabilité n'est pas prise en compte ou une fonction, par exemple du gradient thermique, dans le cas contraire.

L'étude du Lac de Bam avait deux objectifs simultanés :

- lier l'évaporation aux paramètres « vent » et « gradient d'humidité de l'air » surplombant le lac, afin d'en permettre une étude fine ;

- lier l'évaporation aux mêmes paramètres, mesurés en station en dehors de l'influence du lac, de façon à prévoir l'évaporation d'un lac à partir des seules données du climat régional.

Les périodes où les données « LAC » sont disponibles sont réduites à 215 journées réparties en 22 décades privilégiant la saison sèche, soit par suite de pannes du dispositif complexe (décrit dans la deuxième partie), soit faute d'un dépouillement exhaustif.

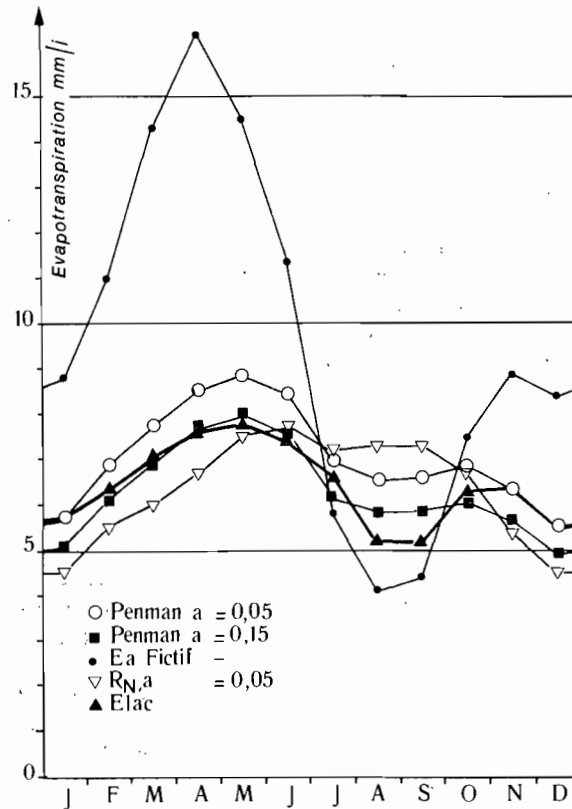


Fig. 8. - Moyennes mensuelles interannuelles de E. PENMAN à partir des observations à Saint-Paul

Mais de bonnes corrélations existent de toutes façons entre les paramètres climatiques « LAC » et « STATION ». Aussi ne nous intéressons-nous d'abord qu'aux seuls résultats obtenus avec les données « STATION » :

- la donnée « vent » est la vitesse moyenne U_2 du vent à 2 m observée à la station Saint-Paul ;
- la donnée « gradient d'humidité » est traduite par la différence moyenne $\Delta ESTA$ entre la pression saturante de vapeur d'eau E_W correspondant à la température superficielle TS du bac Colorado sol nu et la pression de vapeur de l'air E_2 observée sous abri.
- la donnée « gradient de température » traduit enfin la différence moyenne $\Delta T STA$ entre la température superficielle du bac Colorado TS et la température sous abri T_2 .

Nous disposons en fait de trois populations de données « STATION », qui peuvent être corrélées aux estimations ELAC de l'évaporation par bilan hydrique, pour autant qu'elles soient disponibles :

- celle des données moyennes mensuelles de la période 1973-1976,
- celle des données moyennes décadaires de la période 1973-1976,
- les 12 données moyennes mensuelles interannuelles.

La troisième population est la seule contenant suffisamment de données de saison des pluies assurant une bonne

représentativité de l'échantillon pour l'ensemble des situations climatiques. Aussi ne présentons-nous ici que les seuls ajustements la concernant. Nous avons rassemblé dans le tableau VII les données nécessaires aux ajustements :

TABLEAU VII
ELAC et paramètres climatiques à Saint-Paul

	ELAC	TABRI	TMAX	U2ABRI	ΔESTA	ΔTSTA	RG	$\frac{1}{U2ABRI}$	$\frac{ELAC}{\Delta ESTA}$	$\frac{ELAC}{\Delta ESTA \times U2}$	$\frac{\Delta E \times U}{2}$
J	5,7	22,3	30,8	1,45	18,2	-0,9	8,7	0,69	0,313	0,216	26,4
F	6,3	25,6	34,5	1,41	21,1	2,0	9,9	0,71	0,297	0,212	29,8
M	7,0	29,7	37,4	1,54	23,4	-3,6	10,1	0,65	0,299	0,194	36,0
A	7,6	32,5	39,6	1,69	25,4	-3,7	10,4	0,59	0,299	0,177	42,9
M	7,8	32,4	38,7	2,19	22,8	-2,0	10,8	0,46	0,342	0,156	49,9
J	7,4	30,7	36,6	2,39	19,9	-0,5	10,7	0,42	0,372	0,156	47,6
J	6,6	27,6	32,3	1,91	15,9	1,8	9,8	0,52	0,415	0,217	30,4
A	5,2	26,8	31,6	1,56	15,2	2,8	9,8	0,64	0,342	0,219	23,7
S	5,2	27,3	32,5	1,36	16,2	2,7	9,8	0,74	0,321	0,236	22,0
O	6,3	28,8	36,1	1,08	20,8	1,1	9,7	0,93	0,303	0,280	22,5
N	6,4	25,7	35,3	1,15	21,5	0,1	9,4	0,87	0,298	0,259	24,7
D	5,5	23,2	32,6	1,21	18,5	-0,7	8,6	0,83	0,297	0,246	22,4
Moy	6,42	27,7	34,8	1,58	19,9	-0,4	9,8	0,63	0,323	0,204	31,4

Avec les paramètres retenus, l'expression corrélatrice des transferts de flux peut s'écrire :

$$ELAC = (\alpha + \beta \cdot U2) \cdot \Delta ESTA$$

Il s'agit de la très classique formule de DALTON.

Avec notre échantillon de 12 valeurs interannuelles, l'ajustement est :

$$ELAC = 0,224(1 + 0,286 \cdot U2) \cdot \Delta ESTA, \quad r = 0,70$$

Certains auteurs écrivent la formule de DALTON avec une fonction de vent sous forme monôme. Notre échantillon conduit alors à l'expression :

$$ELAC = 0,204 \cdot U2 \cdot \Delta ESTA$$

mais cette expression traduit mal la variabilité mensuelle de $ELAC/U2 \cdot \Delta ESTA$, qui varie en fait (tabl. VII) de 0,156 en fin de saison sèche chaude à 0,280 en début de saison sèche froide. Aussi est-il intéressant d'analyser les variations de $ELAC/U2 \cdot \Delta ESTA$ en fonction de $U2$, ce qui conduit à trois expressions comparables en qualité d'ajustement :

$$ELAC/U2 \cdot \Delta ESTA = 0,347 - 0,085 \cdot U2, \quad r = 0,89$$

$$ELAC/U2 \cdot \Delta ESTA = 0,063 + 0,224/U2, \quad r = 0,92$$

$$ELAC/U2 \cdot \Delta ESTA = 0,283 \cdot U2^{0,691}, \quad r = 0,92$$

Ces expressions introduisent donc le vent comme correctif de la « constante » de la fonction vent sous forme monôme, et on peut estimer que l'on tient compte ainsi de l'advection, mais aussi de l'instabilité thermique, comme VIKULINA (1973) ou HARBECK (1966). L'expérience prouve que divers ajustements sont possibles qui améliorent tous la corrélation, le meilleur étant :

$$ELAC/U2 \cdot \Delta ESTA = 0,078 + 0,207/U2 + 0,006 \cdot \Delta T STA \text{ avec } r = 0,96$$

Cet inventaire des diverses formes de corrélations « classiques » met en évidence l'influence respective de $U2$ (terme turbulent) et de ΔT (terme de stabilité) sur la « constante » de la fonction vent de la formule de DALTON. Le terme en $U2$ est toujours prépondérant, mais on peut voir que si le terme en ΔT intervient pour les faibles valeurs du vent, son influence disparaît pour des fortes valeurs lorsque l'on se rapproche de la convection forcée où l'on sait que l'influence de la stabilité s'atténue évidemment.

Ces considérations sur la formule de DALTON et ses dérivées conduisent à établir des corrélations directes entre

