

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

2<sup>e</sup> partie : échelles journalières et  
infrajournalières (1)

Bernard POUYAUD (2)

## RÉSUMÉ

*Cette deuxième partie présente une approche plus fine de l'évaporation d'une nappe d'eau libre menée ponctuellement grâce à un « évapotron », décrit dans le premier paragraphe. On présente ensuite les résultats obtenus, traités dans un second paragraphe sur la base de bilans journaliers appartenant à quatre décades représentatives de la variabilité annuelle. Le troisième paragraphe consiste en une approche horaire de l'évaporation basée sur quelques journées représentatives appartenant aux trois grands types de temps caractéristiques du climat. Le quatrième paragraphe, à partir de ces trois journées représentatives, décrit plus précisément ces trois « saisons » caractéristiques.*

*La conclusion générale tente une présentation synthétique des différentes méthodes offertes à l'ingénieur pour évaluer l'évaporation de nappe d'eaux libres à diverses échelles spatio-temporelles.*

**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. PART 2 : DAILY AND SHORTER SCALES**

*This second part presents a more detailed approach to the evaporation from a free water surface measured precisely by means of an « evapotron » described in the first section. The results obtained are presented in a second section on the basis of daily balances in four 10-day periods representative of seasonal variations. The third section deals with hourly evaporation on several days representative of three main weather types. The fourth section, using these three representative days, describes more precisely these three characteristic seasons.*

*The conclusion attempts a review of the different methods available to the engineer to estimate open water evaporation on various scales of space and time.*

**KEY WORDS :** Evaporation – Free water surface – Sahel – Burkina – Reservoir management.

## APPROCHE DE L'ÉVAPORATION DU LAC DE BAM AUX ÉCHELLES JOURNALIÈRES ET INFRAJOURNALIÈRES

L'étude théorique de l'évaporation d'une nappe d'eau libre s'attache à modéliser les différents flux (de chaleur, d'humidité, de quantité de mouvement) au-dessus de l'interface évaporante. Les équations de cette modélisation sont plus ou moins complexes, selon qu'elles introduisent ou non le processus d'instabilité, et qu'elles se fondent

(1) La première partie de cet article a paru in *Hydrol. Continent.* 2 (1), 1987.

(2) ORSTOM, Département Eaux Continentales, 2051, avenue du Val de Montferrand, BP 5045, 3402 Montpellier Cedex.

seulement sur les équations de continuité des flux de chaleur et de vapeur ou aussi sur les flux aérodynamiques. Dans tous les cas, ces fonctions ont des paramètres de calage, explicites ou empiriques, qui permettent de répartir l'évaporation sur de courtes périodes, mais supposent qu'elle soit globalement connue pour la période d'ordre supérieur. En clair, elles permettent d'apprécier l'évaporation sur des périodes allant de l'heure à quelques minutes, à condition de connaître par une autre voie l'évaporation journalière.

L'application de ces méthodes nécessite presque toujours la connaissance des profils de vapeur, de température et de vitesse de vent sur de courts pas de temps, ce qui suppose la disponibilité d'un appareillage lourd et complexe que nous décrirons dans un premier chapitre. Nous analyserons ensuite l'évaporation aux échelles journalières, puis infrajournalières, en référence aux principaux paramètres climatiques, facteurs de l'évaporation, avant d'entreprendre une description plus fine de quelques journées représentatives des diverses conditions climatiques saisonnières du Lac de Bam.

### 1. L'ÉVAPOTRON

Le dispositif expérimental, nommé Évapotron, qui fut installé sur le Lac de Bam, devait l'être dans des conditions représentatives, alliées à la nécessaire proximité d'un abri convenable où placer les enregistreurs.

Le site retenu est situé au milieu d'un élargissement du bras principal du lac, à quelques centaines de mètres en amont de la digue reliant la mission de Tourcoingbam au village de Kongoussi (cf. fig. 1).

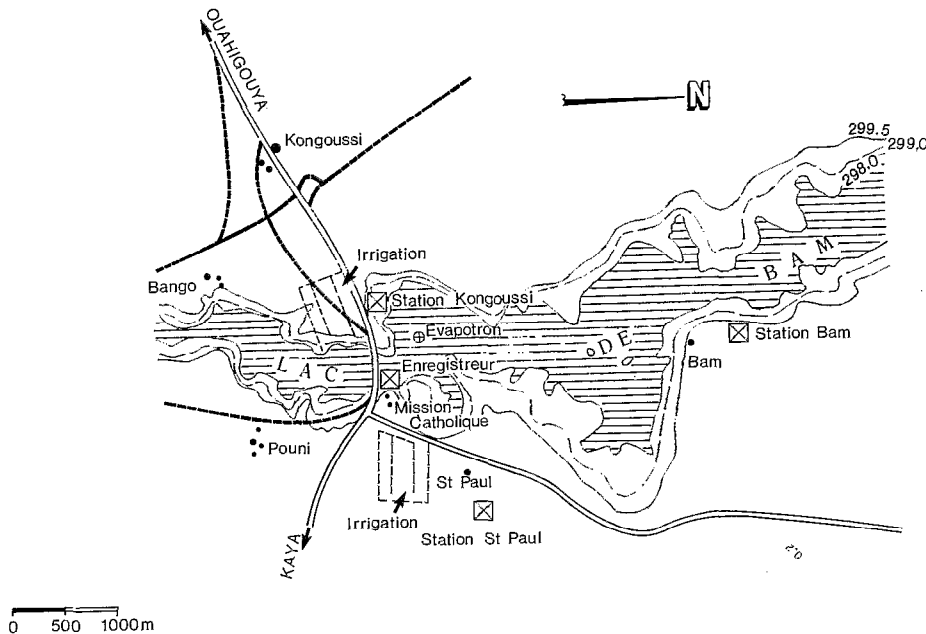


FIG. 1. - Site du Lac de Bam

En hautes eaux, les rives inondées sont à plus de 250 m du dispositif, ce qui assure une homogénéité satisfaisante des caractéristiques thermiques de l'air et de l'eau en cet endroit, et donc une bonne représentativité des conditions moyennes du Lac de Bam. Il peut arriver toutefois, qu'en régime de vent d'Harmattan particulièrement sévère, le niveau supérieur de mesure soit, hors de la couche limite, baigné par l'air continental sec, peu ou pas influencé par le lac.

L'ensemble des instruments de mesure est porté par un mât tubulaire soudé sur un support cruciforme ancré sur quatre blocs de béton d'un demi m<sup>2</sup> de section reposant directement sur le fond de vase argileux du lac. Le mât mesure 6 m de haut et permet donc de suivre la totalité des variations de hauteurs d'eau (cf. fig. 2).

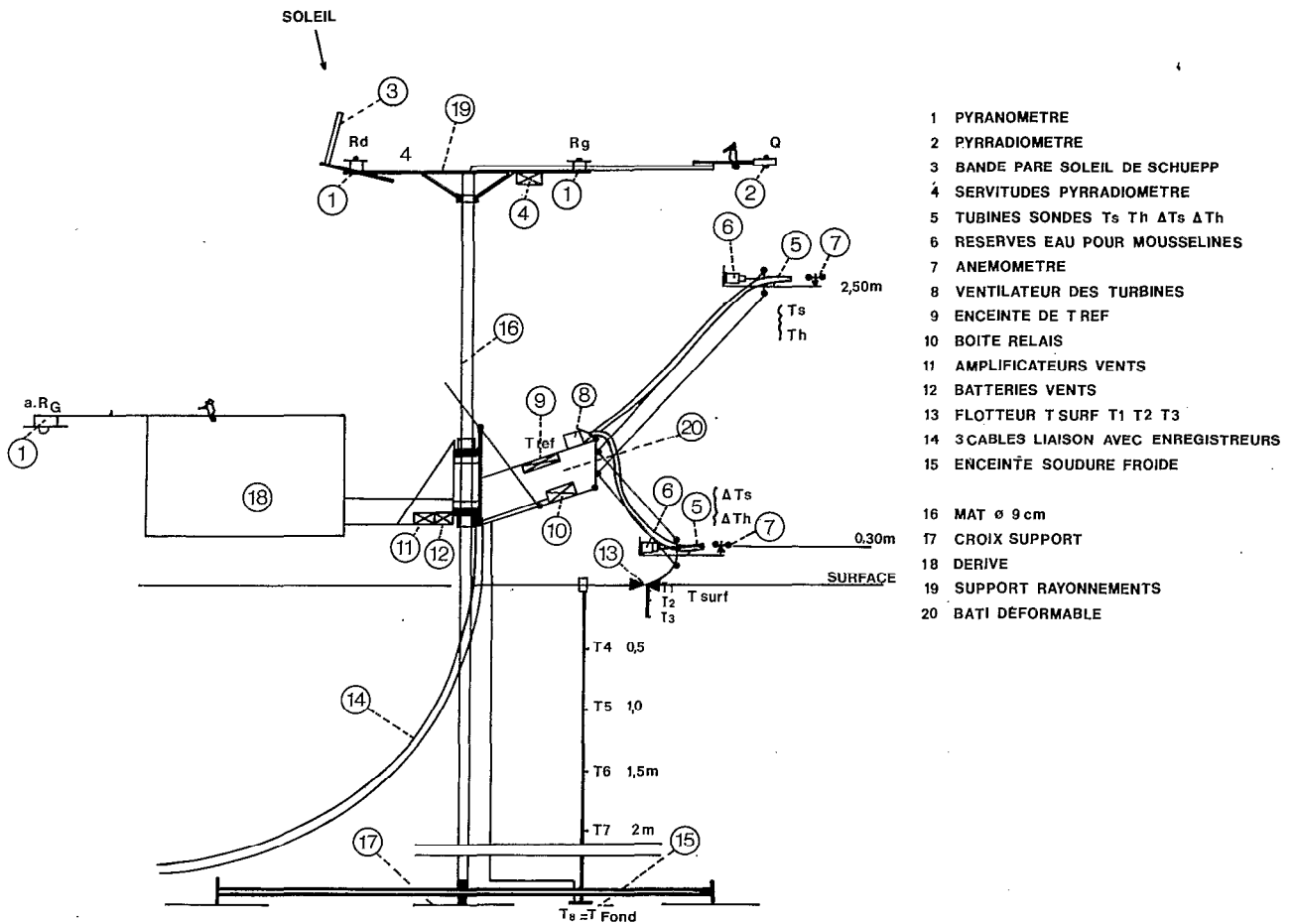


FIG. 2. - Schéma général de l'Évapotron

Sur le faite du mât, une superstructure supporte les appareils de mesure du rayonnement :

- un pyrromètre pour le rayonnement RN,
- deux pyranomètres pour les rayonnements globaux et diffus RG et Rd,

ainsi que les servitudes du pyrromètre.

Le mât support sert de pivot à une structure girouette toujours orientée face au vent dominant grâce à une dérivation arrière. La structure est mobile verticalement le long du mât afin d'accompagner par réglages successifs les variations de grandes amplitudes du niveau du lac. Elle est déformable afin de suivre, par un ajustement mécanique aisé, la baisse progressive du plan d'eau due à l'évaporation. A l'avant de cette structure se trouvent deux bras articulés, aux extrémités réglables à des cotes allant de 0 à 3 m, qui supportent les deux niveaux de sondes de mesures des températures sèche et humide, et les deux anémomètres correspondants. Un pyranomètre inversé, fixé sur cette même structure, permet la mesure du rayonnement réfléchi a.R.G. La température superficielle de l'eau et les trois premiers niveaux du profil de températures (6,5, 12,5 et 25 cm) immergés sont mesurés par un dispositif de thermocouples fixé sur un flotteur attaché au bras inférieur. Les cinq niveaux profonds de ce même profil thermique immergé (50, 100, 150, 200 et Fond) sont fixés sur une canne en plastique fichée dans le fond du lac à proximité du mât support. La turbine de ventilation des tuyères des psychromètres est également fixée sur la structure pivotante, ainsi que les servitudes électriques et électroniques des anémomètres électroniques et du profil thermique immergé.

Le bâti de mesure est relié à la rive par trois câbles multiconducteurs blindés de 250 m de longueur, qui assurent les diverses servitudes électriques et le transfert sur des enregistreurs potentiométriques des mesures faites sur l'Évapotron.

Il est certain qu'avec les modernes centrales d'acquisition de données le dispositif avec enregistreurs graphiques utilisé de 1972 à 1976 pour l'étude du Lac de Bam apparaît comme largement démodé. La tâche de dépouillement de tels diagrammes figuratifs s'est effectivement avérée particulièrement fastidieuse. On peut y reconnaître trois étapes :

- Dépouillement de valeurs moyennes pour chaque pas de temps sur chaque diagramme.
  - Report sur support mécanographique des différentes mesures en identifiant de plus la période de temps correspondante.
  - Traitement numérique.
- Ce dispositif avait pourtant l'avantage de « visualiser » directement les paramètres climatiques.

Ces dépouillements ont permis la constitution de fichiers comportant les valeurs moyennes sur chaque demi-heure ronde des paramètres physiques suivants :

TLAC	: Température superficielle de l'eau à l'Évapotron
T2 et T0,2	: Températures sèches de l'air à 2 m et 0,2 m
E2 et E0,2	: Pressions partielles de vapeur d'eau à 2 m et 0,2 m
EW	: Pression saturante de vapeur d'eau correspondant à TLAC
$\Delta T = TLAC - T2$	: Gradient de température de l'air au-dessus du lac
$\Delta E = EW - E2$	: Gradient de pression de vapeur d'eau
$\beta_{2,S}$	: Rapport de BOWEN entre l'interface et le niveau 2 m
$R_N$	: Rayonnement net
$R_G$	: Rayonnement global
$R_d$	: Rayonnement diffus
$R_r$	: Rayonnement réfléchi
$a = R_r/R_G$	: Albédo
$R_a$	: Rayonnement atmosphérique calculé par la formule de BRUNT
$R\uparrow$	: Rayonnement de grande longueur d'onde de la nappe d'eau.

Les valeurs moyennes journalières de ces divers paramètres ont alors été calculées par sommation des 48 moyennes sur 30'. Cela a permis l'établissement de bonnes corrélations entre les données LAC (à l'Évapotron) et les données STATION (à la station climatologique de Saint-Paul), permettant pratiquement de passer d'un environnement à l'autre.

Le vent reste U2 ABRI, mesuré à Saint-Paul, étroitement corrélé aux observations LAC. Cinq décades ont été ainsi totalement dépouillées :

1 au 10-05-74    1 au 10-11-75    1 au 10-12-75    27-12 au 05-01-76    27 au 31-08-75

De plus, 215 journées, permettant de reconstituer 22 décades, ont fait l'objet d'un dépouillement plus sommaire, portant essentiellement sur  $\Delta E$  LAC,  $\Delta ESTA$  et U2. A partir de ces résultats, on a pu établir, pour des moyennes décadales, les mêmes corrélations que celles obtenues en valeurs mensuelles au cours de la première partie, avec cette fois l'avantage d'avoir introduit dans l'échantillon des valeurs représentatives de l'hivernage. Certains résultats nous seront utiles par la suite, établis sur les 22 décades précédentes :

$$\begin{aligned} ELAC &= 0,23.\Delta ELAC + 1,74.U2 ABRI && \text{avec } r = 0,97 \\ ELAC &= 0,89.\Delta ELAC^{0,65}.U2ABRI^{0,37} && \text{avec } r = 0,97 \end{aligned}$$

les limites de l'échantillon étant :

$$\begin{aligned} 4,95 &< ELAC &< 8,8 \text{ mm.j}^{-1} \\ 14,5 &< \Delta ELAC &< 24,9 \text{ mb} \\ 0,92 &< U2 ABRI &< 2,37 \text{ m.s}^{-1} \end{aligned}$$

Pour mémoire, nous citerons aussi les ajustements similaires de type DALTON, obtenus sur le même échantillon :

$$\begin{aligned} ELAC &= 0,250 (1 + 0,332.U2ABRI) \Delta ELAC && \text{avec } r = 0,81 \\ ELAC &= 0,253.ELAC.U2 \end{aligned}$$

où l'on trouve un résultat très proche du coefficient 0,24 annoncé par RIOU dans sa formule monôme.

## 2. L'APPROCHE JOURNALIÈRE DE L'ÉVAPORATION

A cette échelle de temps, le bilan hydrique est trop imprécis ; le bilan énergétique achoppe sur la mauvaise détermination du terme  $G$ , résultante journalière du flux transmis à l'eau, ainsi que sur l'impossibilité d'évaluer correctement le terme d'advection latérale  $A$ .

Devant cette double impasse à laquelle conduisent les bilans hydrique et énergétique, force nous est donc de recourir aux relations explicitant les transferts aérodynamiques et pour cela d'utiliser les formules statistiques établies à l'échelle de la décade au paragraphe précédent. Ce faisant, nous admettons qu'elles s'appliquent avec les mêmes paramètres de réglage à des valeurs journalières de ELAC,  $\Delta$ ELAC et U2ABRI. Dans ce qui suit, ELAC a été déterminé sous forme d'une moyenne des résultats des deux premières relations statistiques citées dans le paragraphe précédent. Avec cette convention ont donc été dépouillées 45 journées appartenant aux 5 décades représentatives déjà citées.

Les précédents dépouillements avaient permis la détermination journalière de  $1 + \beta$ , RN, RG, Rd, a,  $R\uparrow$  et Ra (par la formule de BRUNT), que nous avons obtenus comme sommes ou moyennes de 24 valeurs horaires calculées individuellement. Les estimations de ELAC, déterminées grâce à la convention précédente, permettent alors de boucler le bilan énergétique à l'échelle journalière en déterminant la somme  $G + A$  du flux calorifique transmis ou reçu par la surface de l'eau et de l'advection :

$$G + A = - (RN + (1 + \beta) \cdot Le \cdot E)$$

où nous conservons la convention de signe habituelle : un flux est positif s'il correspond à un gain du système, négatif dans le cas contraire.

Le bilan radiatif permet aussi une estimation indirecte du rayonnement atmosphérique Ra que l'on pourra comparer à la valeur de Ra calculée par la formule de BRUNT :

$$Ra = RN - RG (1 - a) + L\uparrow$$

Les résultats de ces divers calculs sont reportés dans le tableau général II, où l'on retrouve donc les moyennes ou totaux journaliers suivants :

TEVAP	Température de l'air à 2 m à l'évapotron, en °C.
TLAC	Température superficielle du lac, en °C.
E2LAC	Pression partielle de vapeur d'eau à 2 m à l'évapotron, en mb.
$\Delta$ ELAC	Gradient de pression de vapeur d'eau à l'évapotron, en mb.
U2ABRI	Vitesse du vent sous abri à Saint-Paul, en m.s <sup>-1</sup>
ELAC	Évaporation du lac, valeur moyenne calculée, en mm.j <sup>-1</sup>
LeE	Équivalent énergétique de l'évaporation calculée en J.j <sup>-1</sup>
$1 + \beta$	où $\beta$ est le rapport de BOWEN moyen journalier.
RN	Rayonnement net, en J.j <sup>-1</sup>
RG	Rayonnement global, en J.j <sup>-1</sup>
Rd	Rayonnement diffus, en J.j <sup>-1</sup>
a	Albedo pour les courtes longueurs d'onde, en %
$R\uparrow$	Rayonnement de l'eau de grande longueur d'onde = $\epsilon \cdot \sigma \cdot TLAC^4$ , en J.j <sup>-1</sup>
Ra(BRUNT)	Rayonnement atmosphérique calculé par la formule de BRUNT, en J.j <sup>-1</sup>
Ra(BILAN)	Rayonnement atmosphérique obtenu par bilan, en J.j <sup>-1</sup>
$G + A$	Énergie issue du système, par transmission à l'eau ou advection, en J.j <sup>-1</sup>

Dans ce tableau, figurent également les rapports Rd/RG et RN/RG et le rapport LE/RN particulièrement instructifs.

Une première constatation sera de vérifier l'excellente concordance entre ces évaporations journalières moyennes décadaires, ainsi calculées, et celles obtenues directement par bilan hydrique pour ces mêmes décades (tabl. I). Cela est bien sûr normal puisque les formules reposent sur un ajustement de résultats décadaires incluant ces décades, mais il est heureux de constater, qu'à l'échelle journalière, ces formules conduisent encore à des résultats satisfaisants.

TABLEAU I

ELAC CALCULEE	8,89	6,25	6,07	5,30
ELAC MESUREE	8,7	6,5	5,85	4,95
DATE	1/10-5-74	1/10-11-75	1/10-12-75	27-12/5-1 76

Mais l'examen détaillé du tableau II permet d'autres constatations fort intéressantes.

TABLEAU II

	TEVAP °C	TLAC °C	E2LAC mb	ΔELAC mb	U2 m.s-1	ELAC mm j-1	LeE Jj-1	$1+\beta$	RN Jj-1	RG Jj-1	Rd Jj-1	a %	R↑ Jj-1	Ra BRUNT Jj-1	Ra BILAN Jj-1	G + A Jj-1	Rd/RG	RN/RG	$\frac{LeE}{RN}$
1-05-74	31,4	28,4	14,7	24,0	1,71	8,54	-2071	0,924	1159	1875	1434	8,0	-3903	3341	3337	+755	0,76	0,62	1,79
2-05-74	30,9	28,3	13,2	25,1	1,93	9,25	-2247	0,942	1722	2620	800	7,4	-3896	3271	3192	+395	0,31	0,66	1,30
3-05-74	30,0	29,1	10,9	29,4	1,13	8,46	-2047	0,987	1910	2537	1240	7,8	-3940	3168	3511	+112	0,49	0,75	1,07
4-05-74	30,7	29,0	10,6	29,6	1,51	9,35	-2271	0,968	1771	2459	1105	6,5	-3936	3198	3407	+427	0,45	0,72	1,28
4-05-74	29,6	29,1	10,9	29,4	1,28	8,79	-2136	0,995	1685	2507	1085	7,2	-3941	3166	3300	+440	0,43	0,67	1,27
6-05-74	30,3	29,6	13,9	27,5	1,84	9,57	-2325	0,992	1565	2296	909	8,1	-3963	3263	3418	+741	0,40	0,68	1,49
7-05-74	32,0	29,6	16,1	25,4	2,24	9,92	-2406	0,966	1788	2166	1313	7,6	-3966	3391	3753	+536	0,61	0,83	1,35
8-05-74	29,1	28,8	20,2	19,3	2,38	8,54	-2072	0,998	1337	1892	1366	7,9	-3920	3388	3514	+729	0,72	0,71	1,55
9-05-74	31,0	29,2	20,2	20,3	2,13	8,39	-2034	0,947	1937	2423	1104	7,0	-3941	3461	3655	-41	0,46	0,81	1,03
10-05-74	28,9	29,1	21,1	19,4	2,10	8,10	-1964	1,02	1343	1958	1186	7,5	-3938	3395	3470	+660	0,61	0,69	1,46
	30,4	29,0	15,2	24,9	1,78	8,89	-2157	0,974	1525	2273	1154	7,5	-3934	3303	3456	+475	0,51	0,71	1,33
2--08-75	25,3	27,7	25,7	11,4	1,14	4,57	-1106	1,14	1425	2030	1386	13,6	3866	3323	3538	-174	0,68	0,70	0,78
28-08-75	24,7	28,4	25,7	13,1	2,38	6,85	-1658	1,21	1716	2254	963	13,7	3909	3298	3679	+244	0,43	0,76	0,97
30-08-75	24,1	28,3	25,9	12,4	1,20	4,92	-1191	1,22	1161	1671	1211	12,7	3893	3280	3596	+245	0,72	0,70	1,03
31-08-75	24,6	28,4	25,3	13,6	1,28	5,32	-1287	1,20	1380	1989	978	12,0	3904	3288	3534	+152	0,49	0,70	0,93
	24,7	27,5	27,1	9,6	1,03	3,95	-956	1,19	671	1286	1028	12,9	3857	3325	3408	+459	0,80	0,52	1,42
	24,7	28,1	25,9	12,0	1,41	5,12	-1240	1,19	1271	1846	1113	13,0	3886	3303	3551	+185	0,62	0,67	0,98
1-11-75	26,0	27,1	13,8	22,0	1,11	6,89	-1667	1,05	1189	2305	995	8,9	-3837	3090	2926	+561	0,43	0,52	1,40
2-11-75	25,9	27,2	15,1	20,9	1,03	6,50	-1579	1,07	1359	2513	684	8,5	-3844	3122	2904	+337	0,27	0,54	1,16
3-11-75	26,0	27,3	15,7	20,4	0,91	6,16	-1497	1,06	1250	2310	1120	9,2	-3843	3135	2996	+331	0,48	0,54	1,20
4-11-75	25,4	27,1	16,8	19,0	0,84	5,73	-1392	1,08	1225	2300	956	9,0	-3835	3138	2967	+278	0,42	0,53	1,14
5-11-75	26,2	26,6	14,0	20,8	1,14	6,69	-1626	1,03	1287	2436	524	8,7	-3811	3098	2874	+388	0,22	0,53	1,26
6-11-75	25,5	26,3	13,2	20,9	1,19	6,82	-1653	1,03	1316	2527	367	9,1	-3787	3053	2806	+386	0,15	0,52	1,26
7-11-75	24,4	26,4	14,2	20,2	0,95	6,19	-1502	1,07	1277	2523	308	9,4	-3801	3032	2792	+330	0,12	0,51	1,18
8-11-75	24,4	27,2	15,3	20,8	0,72	5,82	-1412	1,10	1254	2487	329	9,2	-3838	3069	2834	+299	0,13	0,50	1,13
9-11-75	24,6	27,1	15,5	20,2	0,61	5,46	-1325	1,09	1129	2233	476	8,5	-3832	3073	2918	+315	0,21	0,51	1,17
10-11-75	25,8	25,7	14,1	18,8	1,12	6,23	-1512	1,01	1271	2401	301	8,4	-3762	3085	2834	+256	0,13	0,53	1,19
	25,4	26,8	15,1	20,4	0,97	6,25	-1516	1,06	1256	2403	606	8,9	-3819	3089	2885	+348	0,25	0,52	1,21

TABLEAU II (suite)

	TEVAP °C	TLAC °C	E2LAC mb	ΔELAC mb	U2 m.s-1	ELAC mm J-1	LeE Jj-1	1+β	RN Jj-1	RG Jj-1	Rd Jj-1	a %	R↑ Jj-1	Ra BRUNT Jj-1	Ra BILAN Jj-1	G+A Jj-1	Rd/RG	RN/RG	LeE RN
1-12-75	24,5	23,8	11,6	17,8	1,26	6,27	1521	0,979	1457	2261	816	8,0	-3665	2965	3042	+ 32	0,36	0,64	1,04
2-12-75	24,8	25,0	13,7	18,0	0,80	5,45	1323	1,03	1212	2138	831	7,2	-3730	3039	2958	+ 151	0,39	0,57	1,09
3-12-75	24,2	24,4	13,6	16,9	0,91	5,45	1321	1,04	1106	2033	881	7,6	-3700	3000	2928	+ 268	0,43	0,54	1,19
4-12-75	24,3	25,2	14,4	17,9	0,76	5,35	1298	1,06	1066	1962	721	7,9	-3742	3040	3001	+ 310	0,37	0,54	1,22
5-12-75	25,5	24,3	12,8	17,5	1,49	6,60	1601	1,01	1211	2085	565	7,2	-3692	3036	2968	+ 406	0,27	0,58	1,32
6-12-75	23,8	23,7	12,8	16,5	1,32	6,08	1475	1,04	1156	2137	751	7,5	-3667	2966	2846	+ 378	0,35	0,54	1,28
7-12-75	23,1	23,6	11,6	17,6	1,34	6,37	1544	1,04	1015	2003	1265	7,5	-3661	2907	2823	+ 591	0,63	0,51	1,52
8-12-75	22,7	24,0	11,4	18,5	1,13	6,19	1501	1,06	969	1899	1047	8,0	-3680	2888	2902	+ 622	0,55	0,55	1,55
9-12-75	22,6	23,2	11,1	17,3	1,41	6,42	1556	1,05	1162	2126	846	8,4	-3643	2878	2858	+ 472	0,40	0,58	1,34
10-12-75	23,6	23,3	11,2	17,2	1,49	6,53	1583	1,01	1221	2107	785	7,8	-3640	2924	2918	+ 378	0,37		1,30
	23,9	24,0	12,4	17,5	1,19	6,07	1472	1,03	1157	2075	851	7,7	-3682	2964	2924	+ 361	0,41	0,56	1,27
27-12-75	22,4	22,5	12,5	14,7	1,2	5,48	1328	0,999	1002	1684	892	6,8	-3599	2938	3032	+ 325	0,50	0,60	1,33
28-12-75	22,0	22,5	12,7	15,0	1,1	5,38	1305	1,03	305	881	694	8,0	-3600	2936	3094	+ 1039	0,79	0,35	4,28
29-12-75	22,5	22,2	9,5	15,7	1,4	6,03	1462	0,993	1225	1878	742	6,8	-3587	2903	3062	+ 227	0,40	0,65	1,19
30-12-75	21,6	22,1	11,1	17,0	1,3	6,16	1494	1,03	1114	1930	708	6,7	-3583	2790	2896	+ 425	0,37	0,58	1,34
31-12-75	22,4	23,0	10,3	17,9	1,1	6,00	1456	1,03	984	1752	1011	6,8	-3598	2840	2949	+ 516	0,58		1,48
1-01-76	22,6	22,4	11,4	15,6	1,0	5,37	1301	1,00	811	1514	1036	6,5	-3601	2882	2996	+ 490	0,68	0,54	1,60
2-01-76	22,7	22,6	12,6	14,8	1,1	5,39	1309	1,01	895	1556	1024	6,8	-3614	2919	3059	+ 427	0,66	0,58	1,46
3-01-76	23,4	22,5	13,1	13,9	1,2	5,23	1272	1,00	932	1562	1000	5,1	-3604	2959	3054	+ 340	0,64	0,60	1,36
4-01-76	24,4	22,7	18,4	9,2	1,1	4,02	978	0,89	763	1337	801	5,9	-3616	3133	3121	+ 107	0,60	0,57	1,28
5-01-76	24,2	24,5	19,5	11,2	0,7	3,98	967	1,03	1043	1659	787	4,8	-3701	3154	3165	-47	0,47	0,63	0,93
	22,8	22,7	13,1	14,5	1,12	5,30	1287	1,00	907	1575	870	6,4	-3610	2945	3042	-47	0,55	0,57	1,42

### 2.1. Le flux évaporatoire $LeE$ , le rayonnement net $RN$ et le rapport de BOWEN $\beta$

La comparaison de  $LeE$  et de  $RN$  grâce à leur rapport  $LeE/RN$  est particulièrement significative.

De novembre à janvier, alors que se développe la saison sèche fraîche, ce rapport  $LeE/RN$ , calculé sur des moyennes décennales, croît de 1,21 à 1,42. En effet, au cours de cette même période, la baisse de l'évaporation  $LeE$  est proportionnellement moindre que la chute du bilan radiatif  $RN$ . Pendant le même temps, le rapport de BOWEN  $\beta$  reste positif ( $TLAC > TAIR$ ), mais tend vers zéro ( $TLAC = TAIR$ ). Les flux de chaleur et de vapeur d'eau sont tous les deux négatifs en moyenne journalière, le lac fournissant de la chaleur à l'air qui le surplombe.

Avec l'arrivée de la saison sèche chaude, la température moyenne de l'air devient supérieure à celle du lac. Le rapport de BOWEN moyen journalier est alors négatif, le flux de chaleur sensible est positif. Le rapport  $LeE/RN$  reste nettement supérieur à 1 et proche de 1,30. En effet, les vitesses de vent et le déficit de saturation sont suffisamment élevés pour entretenir un flux évaporatoire soutenu qu'abonde une advection importante.

L'arrivée de la saison des pluies bouleverse toutes ces caractéristiques, puisque l'évaporation chute très nettement alors que le rayonnement net conserve des valeurs moyennes. Le rapport  $LeE/RN$  est voisin de 1, voire inférieur à 1. Le rapport de BOWEN atteint en valeur moyenne journalière 0,20. La température du lac est de plusieurs degrés supérieure à la température de l'air alors que le gradient de pression partielle de vapeur d'eau atteint ses valeurs les plus faibles.

Il est également intéressant d'examiner les variations du rapport  $LE/RN$  en fonction du rapport de BOWEN  $\beta$  (cf. fig. 3). Quoique réduite aux 5 points correspondant aux 5 décades, cette variation est significative :

- de fortes valeurs de  $LeE/RN$  correspondent à de faibles valeurs de  $\beta$  qui peut même être négatif. Nous sommes en saison sèche fraîche ou chaude ;
- de faibles valeurs de  $LeE/RN$  sont au contraire significatives des fortes valeurs de  $\beta$  obtenues en cours d'hivernage.

Cette correspondance est intéressante dans la mesure où  $LeE$  est obtenu ici à partir d'une formule aérodynamique indépendante des données qui ont permis séparément la mesure de  $RN$  ou le calcul de  $\beta$ .

Il est bien évident que ces considérations s'appuient sur des moyennes journalières qui intègrent en fait des valeurs horaires très contrastées si ce n'est contradictoires. Une explication valable en moyenne sur la journée peut donc être parfaitement erronée pour une notable partie (quoique minoritaire) de cette même journée. L'importance de la stabilité atmosphérique est évidemment déterminante, mais il reste délicat de la faire intervenir, car ses processus d'intervention sont analysables sur un court pas de temps, mais ne peuvent que difficilement être appréhendés sur une période journalière.

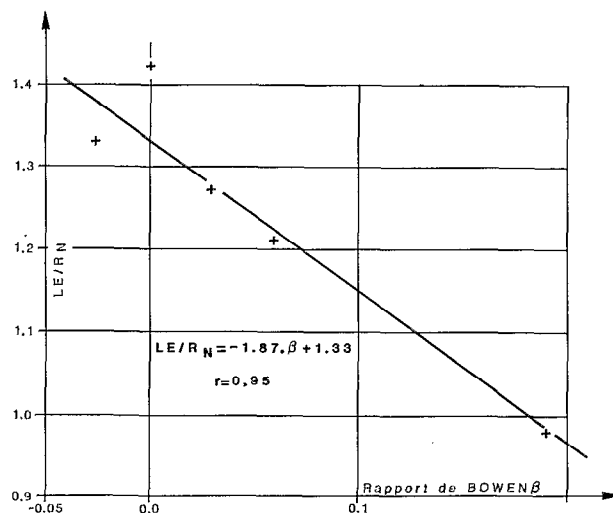


FIG. 3. - Rapport  $LE/RN$  en fonction du rapport de BOWEN



Cet effet se trouve compliqué de ce que les caractéristiques de stabilité de l'air au-dessus du lac sont en fait acquises au-dessus des terres environnantes, avant leur passage sur le lac (pour autant qu'existe un vent significatif). Pour caractériser cette stabilité, il faudrait donc retenir un gradient thermométrique représentatif existant entre l'air et la surface du sol et non celui entre l'air et la surface du lac.

Toutefois, lorsque le gradient TLAC-TAIR positif est très important (cas des belles journées d'hivernage par exemple), la stabilité ou l'instabilité de la masse d'air au-dessus du lac est rapidement imputable aux seuls paramètres climatologiques LAC et plus aux paramètres des alentours. Il est certain alors, que la forte instabilité atmosphérique a une action notable sur l'évaporation, qui explique les faibles valeurs du rapport  $LeE/RN$ , insuffisamment expliquée par les fortes valeurs de  $\beta$  concomitantes.

### 2.2. Le rayonnement réfléchi $R_r$ , le rayonnement de l'eau $R \uparrow$ et le rayonnement atmosphérique $R_a$

Pour le visible et les courtes longueurs d'ondes, les valeurs de l'albédo sont variables en cours d'année, la cause en étant une modification progressive en cours de saison sèche, puis brutale en début d'hivernage, de la couleur de l'eau. En effet, de novembre à mars, les eaux du Lac Bam s'éclaircissent par sédimentation progressive en même temps que la température de l'eau diminue et se réduit l'activité photosynthétique des algues. Avec la saison sèche chaude, la température du lac monte brutalement, provoquant un regain d'activité biologique qui trouble l'eau et augmente l'albédo, les premières pluies apportent au lac les premiers sédiments qui conduisent à un albedo qui peut atteindre et dépasser 13 % en valeur moyenne journalière en plein hivernage.

Les variations des températures superficielles moyennes journalières sont relativement modérées d'un jour à l'autre. On ne note donc pas d'importantes variations de  $R \uparrow$  à l'échelle de la décade. Par contre, les variations entre saisons sèche fraîche et chaude sont beaucoup plus importantes. Mais la température superficielle n'explique pas seule ces variations du rayonnement  $R \uparrow$ . Les calculs du tableau I ont été menés avec une valeur de l'émissivité  $\varepsilon$  égale à 0,96, valeur recommandée pour de l'eau propre. Il est certain que, lorsque l'albedo passe de 7 % à 13 % entre la saison sèche et l'hivernage, la valeur de l'émissivité  $\varepsilon$  doit, elle aussi, chuter de façon sensible pour atteindre une valeur proche de 0,90 à 0,92. Nous ne disposons malheureusement pas de l'appareillage qui aurait permis une évaluation même sommaire de  $\varepsilon$ .

Les valeurs obtenues par BILAN (il s'agit en fait de  $\varepsilon.R_a$  ou de  $R_a(1-a')$ , où  $a'$  est l'albédo de l'eau pour les grandes longueurs d'onde), s'écartent assez considérablement des valeurs fournies par la formule de BRUNT, modifiée par RIOU (1972) et réputée valable pour ces latitudes. Cet écart n'est pas stable et peut être positif ou négatif selon la saison considérée : en début de saison sèche fraîche,  $R_aBRUNT$  est supérieur à  $R_aBILAN$ , en fin de saison sèche fraîche et en saison sèche chaude c'est l'inverse. Enfin, en période d'hivernage  $R_aBILAN$  devient très nettement supérieur à  $R_aBRUNT$ . Cette dernière différence est explicable par une surévaluation de l'émissivité  $\varepsilon$  en hivernage qui conduit à un  $R \uparrow$  trop fort et donc aussi à un  $R_aBILAN$  trop élevé en hivernage.

Pour expliquer les autres écarts, d'amplitude plus faible, il faut revenir sur la définition de  $R_aBRUNT$  qui dans la formule retenue ne tient aucun compte de la nébulosité, puisque nous ne disposons pas en routine des moyens de calculer le coefficient correcteur. De plus, nous aurions dû en toute rigueur faire intervenir l'albédo  $a'$  de grandes longueurs d'onde. Ainsi, les non-prises en compte de la nébulosité dans le calcul de  $R_aBRUNT$ , et de l'albédo  $a'$  dans le calcul de  $R_a(1-a')$  BILAN, permettent d'expliquer les écarts obtenus entre ces deux évaluations du rayonnement atmosphérique.

### 2.3. Les flux transmis au lac $G$ et advectif $A$

Nous associons dans ce chapitre deux flux d'essence très différente puisque l'un,  $G$ , est un flux transmis (ou reçu) directement par la surface liquide du lac à travers la mince couche évaporante, et l'autre,  $A$ , est un flux advectif latéral que l'on a décomposé en un flux spécifique par unité de surface pour le faire intervenir dans le calcul du bilan énergétique. N'étant pas en mesure de calculer, ou de mesurer  $G$  en routine, il nous est impossible de séparer  $G$  et  $A$  d'où la nécessité de les appréhender globalement.

Le tableau II montre que le système, que constituent le lac et l'air le surplombant, est presque systématiquement receveur d'énergie, puisque la somme des flux  $G + A$  est positive, ce qui d'après notre convention de signe correspond à un gain énergétique. Les variations des moyennes décennales de  $G + A$  restent globalement peu variables en saison sèche fraîche (de 348 J à 385 J de novembre à janvier), s'élèvent nettement en saison sèche chaude (475 J) et chutent par contre considérablement durant l'hivernage (185 J). Ces variations correspondent globalement assez étroitement à l'importance de l'évaporation de chacune de ces périodes. A l'intérieur de chacune de ces décades test, on peut voir que les variations de  $G + A$  sont considérables d'une journée à l'autre. Nous ne devons certes

pas perdre de vue le fait que  $G + A$  provient d'un bilan obtenu à partir d'une détermination aérodynamique de LeE évidemment sujette à caution. Malgré cette imprécision originelle, il est certain que l'importance de  $G + A$  témoigne de ce que le milieu extérieur apporte continuellement de l'énergie au système évaporant :

– Cette énergie provient d'abord de l'eau du lac et s'accompagne de variations de sa température moyenne qui compensent ainsi énergétiquement les à-coups de l'évaporation. Mais le sol supportant le lac est aussi le siège d'un gradient thermique et tout se passe alors comme si la masse d'eau du lac était continuellement chauffée par le sol environnant. Ceci est d'ailleurs vérifié par les mesures de températures du sol à  $-1$  m (effectuées à St-Paul) dont les résultats sont systématiquement supérieurs, en toutes saisons, de plusieurs degrés aux températures de l'eau du fond du lac.

– Mais cette énergie provient également pour une autre part, déterminante les jours de forte évaporation, des échanges advectifs d'énergie latérale, l'air chaud environnant, poussé par le vent, venant remplacer l'air refroidi et humidifié par son séjour au-dessus du lac.

Les commentaires précédents traduisent la situation énergétique telle qu'elle peut être appréhendée par des moyennes journalières ou décadaires qui masquent naturellement la réalité spécifique de phénomènes instantanés qui se succèdent en cours de journée et peuvent être contradictoires durant les phases diurnes et nocturnes, selon la succession d'épisodes nuageux ou à cause de brusques sautes de l'orientation ou de l'intensité du vent.

### 3. L'APPROCHE INFRAJOURNALIÈRE DE L'ÉVAPORATION

Dans les paragraphes précédents, est apparue la nécessité de descendre au-dessous de l'échelle journalière, afin d'appréhender les phénomènes sur des pas de temps suffisamment courts pour qu'ils puissent être supposés stables et homogènes. On admet en général que la 1/2 heure est la bonne durée pour analyser ce type de phénomène atmosphérique. Tous les calculs qui vont suivre ont été faits à cette échelle, même si la présentation des résultats est faite en moyenne horaire.

Vingt journées représentatives, sélectionnées parmi les 5 décades précédentes, ont donc été entièrement dépouillées à l'échelle horaire. On trouvera plus loin les trois tableaux (III, IV, V) correspondant à trois journées représentatives des trois grands types de temps caractéristiques du climat. Ces tableaux comportent toutes les grandeurs des tableaux de moyennes journalières des chapitres précédents à l'exception des rapports  $Rd/RG$ ,  $RN/RG$  et  $LE/RN$  sans grande signification à l'échelle horaire.

Ils comportent de plus quelques nouveaux paramètres :

- T 2 : Température sèche au niveau 2 m à l'Évapotron (TEVAP), en °C.
- T 0,2 : Température sèche au niveau 0,2 m à l'Évapotron, en °C.
- T LAC : Température superficielle de l'eau, en °C.
- E 2 : Pression partielle de vapeur d'eau au niveau 2 m à l'Évapotron (E2LAC), en mb.
- E 0,2 : Pression partielle de vapeur d'eau au niveau 0,2 m à l'Évapotron, en mb.
- EWLAC : Pression de vapeur d'eau saturante à la température TLAC, en mb.
- $\beta$  2.S : Rapport de BOWEN  $B_o$  entre le niveau 2 m et la surface.
- $\beta$  0.2.S : Rapport de BOWEN  $B_o$  entre le niveau 0,2 m et la surface.
- $\beta$  2.0,2 : Rapport de BOWEN  $B_o$  entre le niveau 2 m et le niveau 0,2 m.

Les valeurs horaires de LeE ont été calculées, comme pour les valeurs journalières, grâce aux formules aérodynamiques à partir des moyennes horaires de  $\Delta ELAC$  et de U2ABRI.

Elles ont dû être homogénéisées chaque jour pour que la somme des 24 évaporations horaires correspondent au LeE journalier obtenu à partir des moyennes journalières de  $\Delta ELAC$  et U2ABRI. Bien sûr, on pouvait déjà, sans doute à juste titre, douter de la légitimité d'utiliser à l'échelle journalière ces formules aérodynamiques établies pour des périodes mensuelles et décadaires. Leur utilisation à l'échelle horaire est encore plus hardie, mais c'est la seule procédure qui conduise à des valeurs horaires vraisemblables (au moins quant à leur distribution), puisqu'il n'est pas possible de boucler les bilans énergétiques horaires, faute d'évaluation satisfaisante de  $G + A$ .

On remarquera à ce propos que les sommes journalières des 24 flux horaires  $G + A$  diffèrent notablement des valeurs obtenues par simple bilan journalier à partir des sommes journalières de RN, LeE et de la moyenne journalière de  $1 + \beta$ . Cela est dû aux considérables variations horaires de  $\beta$  et à la relation non linéaire en  $\beta$  liant  $G + A$  à LE et RN.

Avant une analyse plus détaillée des trois journées annoncées, certaines remarques générales peuvent être faites en examinant l'ensemble des vingt journées disponibles.

### 3.1. Le rayonnement net RN et l'évaporation LE à l'échelle horaire

Dans les remarques qui suivent, nous n'oublions pas que RN est obtenu à partir d'une mesure aisément contrôlable, qui peut être comparée notamment aux résultats du bilan radiatif entre les mesures de RG, a.RG et L $\uparrow$  et l'évaluation par une formule de Ra, tandis que LeE n'est que le résultat d'une approche empirique statistique qui n'est vraiment justifiée qu'à l'échelle mensuelle et décadaire. S'il semble donc certain que l'évaporation d'une période donnée, correspondant à des valeurs moyennes de  $\Delta E$  et U2, est fonction de la durée de cette période, il ne semble pas que les paramètres de réglage varient considérablement lorsque l'on reste dans des gammes moyennes de  $\Delta E$  et U2. Les valeurs calculées des LeE horaires sont donc vraisemblablement à peu près correctes, ou tout au moins du bon ordre de grandeur, ce qui justifie les comparaisons entre LeE et RN qui vont suivre.

Un examen, même superficiel, des bilans énergétiques horaires, montre qu'il n'y a pas correspondance entre les évaporations et les rayonnements nets correspondants. Durant la nuit, le rayonnement net est systématiquement négatif, c'est-à-dire que le rayonnement émis par la surface de l'eau reste toujours supérieur au rayonnement atmosphérique. Quoiqu'en moyenne toujours au moins de moitié inférieure à ses valeurs diurnes, l'évaporation nocturne reste toujours soutenue, quelle que soit la période de l'année. Les fortes valeurs diurnes de RN obtenues en milieu de journée coïncident évidemment avec les fortes valeurs de  $\Delta E$  mais aussi généralement de U2 et donc de l'évaporation LeE. Mais on peut dès maintenant noter une forte inertie de la dépendance de LeE à RN à l'échelle horaire même en phase diurne, puisque les passages nuageux même prolongés (plus d'une heure) n'entraînent pas de variations concomitantes et significatives de l'évaporation. Ainsi se trouve révélée la différence profonde qui sépare une surface évaporante végétale d'une surface d'eau libre : l'évaporation d'une surface d'eau libre n'est plus fonction à l'échelle horaire du rayonnement net disponible, contrairement à l'évapotranspiration d'une surface végétale qui le demeure. Cela s'explique par les différences fondamentales entre les processus mêmes de l'évaporation et de l'évapotranspiration dans l'un ou l'autre cas.

Dans le cas d'une *surface d'eau libre*, on se trouve dans de strictes conditions de diffusion gazeuse de la vapeur d'eau au-dessus d'une surface évaporante de température déterminée, baignée par une atmosphère aux gradients de température et de pression partielle de vapeur d'eau également connus. L'énergie nécessaire à l'évaporation, permise par les conditions aux limites du système, est alors prise au système lui-même, c'est-à-dire à l'air et à l'eau.

Compte tenu des différences d'ordre de grandeur des chaleurs spécifiques de l'un et de l'autre, c'est surtout l'eau qui cède son énergie calorifique là où elle est dépensée, c'est-à-dire à l'interface évaporante, même si des phénomènes d'advection latérale renforcent artificiellement la part de la phase gazeuse dans l'alimentation en énergie. Dans ce schéma, l'apport du rayonnement solaire est donc indirect et n'est pas à court terme indispensable puisque par exemple l'évaporation continue pendant la nuit et a fortiori durant les épisodes nuageux. Il n'est donc pas contradictoire de mettre en évidence à long terme (année, mois, décade ou à la rigueur journée) des corrélations entre rayonnement global RG ou rayonnement net RN et l'évaporation LE d'une surface d'eau, mais il est inutile de tenter de telles corrélations directes à une échelle inférieure et notamment horaire. A cette échelle, seules sont donc physiquement justifiées les approches de l'évaporation sous son aspect de diffusion gazeuse, à moins que l'on soit capable d'évaluer précisément et à cette échelle de temps l'énergie G cédée par l'eau et celle provenant de l'advection.

- Dans le cas des surfaces végétales évaporantes, le phénomène physique se trouve compliqué par l'intervention d'autres phénomènes biologiques :

- L'évapotranspiration de la plante s'effectue au travers de stomates que la plante peut ouvrir ou fermer selon certaines stimulations extérieures liées à son rythme biologique (manque ou excès d'énergie solaire).

- Les surfaces évaporantes enfin baignent dans l'air et ne sont donc reliées que par les tiges au stock calorifique que pourrait constituer le sol. L'énergie nécessaire à l'évaporation ne peut donc être prise que dans l'air ambiant ou à la substance végétale elle-même.

La disponibilité en énergie immédiatement disponible devient alors le facteur limitant du système et le rayonnement solaire affirme sa prééminence même sur très courte période, puisque les possibilités de volant thermique de l'air ambiant restent très limitées et que l'inertie thermique du sol n'a que des effets indirects et donc retardés.

### 3.2. Le rapport de BOWEN Bo ou $\beta$

Le rapport de BOWEN compare le flux de chaleur sensible (échange d'énergie entre l'interface évaporante et l'air surplombant) et le flux de chaleur latente LeE (énergie utilisée pour l'évaporation) dans des conditions de neutralité atmosphérique :

$$\beta = Bo = \frac{H}{L_e E} = \frac{c_p(\bar{\theta}_s - \bar{\theta})}{L_e(\bar{q}_s - \bar{q})}$$

Dans les conditions climatiques qui nous intéressent, il y a presque toujours évaporation ( $q_s > q$ ) et avec nos conventions de signe, on peut toujours écrire  $E < 0$ .

L'examen des tableaux des bilans énergétiques journaliers montre que le rapport de BOWEN  $\beta$  varie considérablement en cours de journée en grandeur et en signe mais qu'il est possible de dégager des tendances homogènes pour chaque période climatique annuelle :

- Saison sèche fraîche (novembre à février) :  
 $\beta$  varie de + 0,20 à + 0,30 en cours de nuit à — 0,25 à — 0,35 en cours de journée quand l'air cède de l'énergie à l'eau.
- Saison sèche chaude (avril à juin) :  
 $\beta$  varie de + 0,05 à + 0,10 la nuit à — 0,05 à — 0,15 le jour.
- Hivernage (juillet à septembre) :  
 $\beta$  reste en quasi-permanence positif; il peut atteindre + 0,40 la nuit pour ne se réduire qu'à + 0,05 le jour.

Ces valeurs sont celles obtenues pour  $\beta$  2-S, c'est-à-dire entre la surface de l'eau et le niveau 2 m. Nous verrons dans l'étude plus fine de certaines journées particulières que l'étude de  $\beta$  0,2-S et  $\beta$  0,2-2 permet des conclusions intéressantes sur l'évolution des profils de température et d'humidité.

### 3.3. Les flux $G + A$

Même lors des journées les plus chaudes, le lac ne gagne de l'énergie, par conduction à partir de la surface, que durant les heures les plus chaudes et ensoleillées de la journée. Le solde journalier reste le plus généralement négatif en raison des importantes pertes nocturnes, période durant laquelle la seule source d'énergie, avec l'advection, reste le considérable réservoir thermique que constitue le lac. Il demeure là encore impossible de séparer  $G$  de  $A$ . On peut toutefois remarquer que l'advection latérale est d'autant plus vraisemblable que le vent est important. Ainsi, si on remarque que le vent est en toute saison beaucoup plus faible en cours de nuit, faut-il conclure que l'essentiel de l'advection correspond aux périodes diurnes particulièrement venteuses.

Ainsi, l'énergie nécessaire à l'évaporation durant la nuit proviendrait essentiellement de la baisse systématiquement observée de la température de la masse d'eau évaporante. Cette remarque doit être atténuée par l'existence de coups de vent nocturnes inopinés, qui remplacent parfois très brutalement le coin d'air humide installé au-dessus du lac par des masses d'air plus sèches et plus chaudes venues des alentours, restituant, à l'échelle du lac, les phénomènes bien connus de brise de terre et brise de mer.

## 4. ANALYSE FINE DE JOURNÉES REPRÉSENTATIVES

Le dispositif installé sur l'évapotron permettait la mesure en deux niveaux (0,2 m et 2,0 m) des paramètres climatiques principaux (température et humidité) ainsi que celle de la température superficielle de l'eau. Ainsi pouvaient être esquissées les formes des profils de températures et de pression de vapeur d'eau au-dessus du lac. Nous allons utiliser ces mesures pour décrire heure par heure, 3 journées représentatives des trois grands régimes climatiques susceptibles de régner sur le Lac de Bam :

Saison sèche chaude : mars-avril-mai-juin : 2 mai 1974

Saison des pluies : juin-juillet-août-septembre : 27 août 1975

Saison sèche fraîche : octobre-novembre-décembre-janvier-février : 4 janvier 1976.

Pour chacune de ces journées, les principaux termes du bilan radiatif et énergétique (RN, RG, Rr, LeE et H) et les principaux paramètres climatiques ( $T_2$ , TLAC, E2, EWLAC,  $\Delta$ ELAC,  $\beta$ 2. S et U2) sont reportés heure par heure sur un graphique spécifique.

Nous avons de plus reporté sur un graphique triaxial les températures et pressions de vapeur d'eau à 06, 12, 18 et 24 h à Saint-Paul, Bam, l'Evapotron du lac et Kongoussi. Ces graphes permettent une visualisation sommaire de l'évolution, d'une station à l'autre, des profils de température et d'humidité, donc d'évaluer l'importance de l'advection dans diverses conditions météorologiques et à différentes heures de la journée.

Les paramètres représentés sur les graphes varient d'une station à l'autre :

- Saint-Paul :           • Température et pression de vapeur sous abri  
                           • Température sous sol nu (— 5 cm)
- Bam et Kongoussi :   • Température et pression de vapeur sous abri
- Évapotron :           • Température et pression de vapeur de l'air à 2,0 m et 0,2 m  
                           • Température superficielle de l'eau et pression saturante de vapeur d'eau correspondante.

Il nous est alors possible de présenter une description énergétique et climatique de chacune de ces journées.

L'analyse fine de l'évaporation journalière et horaire, et particulièrement celle présentée pour ces 3 journées représentatives, montre bien qu'il est possible d'ordonner les situations climatiques de la région du Lac de Bam en trois classes « types », dotées chacune bien sûr d'une gamme plus ou moins contrastée de variations propres.

Ces situations climatiques types peuvent être décrites par un éventail des valeurs de leurs principales caractéristiques climatologiques, notamment par les profils de température et d'humidité au-dessus du lac, mais aussi par la présence ou l'absence d'advection latérale et une définition de l'état de stabilité ou d'instabilité des couches d'air surplombant ou jouxtant le lac, cela dans les cas diurne et nocturne, le plus souvent très nettement différenciés.

Nous allons donc définir chacune de ces trois familles de situations climatiques types, qui seront illustrées chacune par une journée typique.

#### 4.1. La saison sèche chaude

Le 2 mai 1974 – Tableau III – Figure 4

*En valeurs moyennes journalières*, les températures de l'air sont élevées ( $> 30^{\circ}\text{C}$ ) et toujours supérieures de 1 à  $2^{\circ}\text{C}$  à celles de la surface du lac. Le gradient de pression de vapeur d'eau est toujours important (20 à 30 mb), provoqué autant par les fortes températures superficielles de l'eau que par les faibles pressions de vapeur d'eau de l'air ambiant. La vitesse du vent est élevée (1,5 à  $2,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Le rayonnement net est très élevé (1 300 à  $2\,000\text{ J}\cdot\text{j}^{-1}$ ). L'eau est relativement propre, l'albedo conserve donc des faibles valeurs. Le coefficient de BOWEN est le plus souvent négatif ( $-0,075 < \beta < 0,02$ ).

L'examen *des valeurs moyennes horaires* des températures et des pressions de vapeur d'eau, montre des comportements diurne et nocturne parfaitement représentatifs des journées que domine cette situation climatique.

*Le jour* est caractérisé par des profils (fig. 5) de températures typiques d'une stabilité atmosphérique relative établie rapidement au-dessus du lac grâce à des températures superficielles qui restent relativement fraîches, a contrario des couches d'air au-dessus des rives, que des températures superficielles de sol très importantes maintiennent dans un état d'extrême instabilité. Les fortes vitesses du vent sont à l'origine de cette rapide stabilisation de l'atmosphère dominant le lac, mais aussi des profils de températures particulièrement plats qui l'accompagnent, en contraste avec les profils de pression de vapeur d'eau, écrasés, qui traduisent une évaporation particulièrement soutenue. Ces journées se singularisent aussi par un apport calorifique advectif très significatif.

*La nuit* présente des profils de températures également pratiquement plats, puisque la température de l'eau voisine celle de l'air ou lui est même légèrement supérieure, induisant alors l'apparition d'un niveau d'inversion thermique au voisinage de la surface de l'eau, séparant des couches minces inférieures instables du reste des couches atmosphériques plus stables. Nous avons attribué ce phénomène, que nous retrouverons dominant dans une autre situation type, à une réaction de stabilisation des couches de la basse atmosphère, suite à l'apparition de températures superficielles de l'eau du lac supérieures à celles de l'air dominant, réaction permise par la chute nocturne des vitesses de vent qui permet la mise en place d'un « coin » d'air humide surplombant le lac. Ainsi l'existence d'un niveau d'inversion du profil de température nocturne s'observerait, semble-t-il, systématiquement lorsque s'établirait un profil stable en cours de journée, qui se refroidirait globalement jusqu'à devenir inférieur à la température de surface, déterminant ce niveau d'inversion. Alors que la simple comparaison de la température à 2 m et de la température superficielle pourrait laisser croire à un profil instable, la prise en compte du niveau 0,2 m indique au contraire la coexistence d'une couche inférieure instable de faible épaisseur, coincée sous une couche d'air stable, relativement plus humide qu'en cours de journée ou qu'au-dessus des sols environnants. Les faibles vitesses de vent font que l'advection lors de cette phase nocturne reste probablement modeste, excepté lors des coups de vent susceptibles de renouveler brutalement tout ou partie du « coin » d'air humide surplombant le lac.

On caractérisera en résumé cette situation climatique par des températures de l'air et de l'eau élevées, une forte évaporation diurne et nocturne et donc des vitesses de vent et une advection latérale également soutenues. Néanmoins, alors que l'instabilité atmosphérique, surtout diurne, est très importante sur les sols alentour, la basse atmosphère surplombant le lac reste remarquablement stable en cours de journée et même en période nocturne, grâce à l'éventuelle mise en place du niveau d'inversion thermique précité.

TABLEAU III

2/5/74	T 2	T0,2	TLAC	E2	E0,2	EWLAC	$\beta 2,5$	$\beta 0,25$	$\beta 2,0,2$	UZ ABRI	$\Delta$ ELAC	LE	RN	RG	Rd	aRG	L $\uparrow$	Ra BRUNT	Ra(1-a') BILAN	C + A	
0	26,7	25,7	28,3	18,6	22,9	38,4	0,054	0,109	-0,144	0,2	19,7	-44	-35	0	0	0	-162	135	127	+81	
1	27,0	25,9	28,1	15,9	20,9	38,0	0,035	0,084	-0,133	0,3	22,2	-51	-35	0	0	0	-162	133	127	+88	
2	26,6	25,3	28,0	13,4	18,9	37,7	0,039	0,094	-0,149	0,3	24,3	-55	-35	0	0	0	-162	129	127	+92	
3	26,6	26,0	28,0	13,1	18,3	37,7	0,037	0,066	-0,071	0,2	24,7	-52	-35	0	0	0	-162	129	127	+89	
4	25,9	24,9	28,0	14,7	19,5	37,7	0,060	0,112	-0,137	0,3	23,1	-53	-35	0	0	0	-162	129	127	+91	
5	26,3	25,5	28,0	14,7	19,7	37,7	0,048	0,091	-0,112	0,4	23,0	-56	-27	1	1	0	-162	130	134	+85	
6	27,4	27,1	27,8	13,9	19,5	37,4	0,012	0,025	-0,031	0,4	23,5	-56	26	24	21	-10	-161	131	173	+30	
7	28,2	28,0	27,7	12,9	18,4	37,0	-0,014	-0,009	-0,026	2,0	24,1	-94	70	116	46	-12	-161	131	127	+23	
8	30,7	30,9	27,7	11,5	17,7	37,0	-0,077	-0,106	0,012	4,2	25,6	-140	159	208	62	-15	-161	134	127	-30	
9	32,6	32,8	27,8	10,6	17,5	37,2	-0,118	-0,165	0,018	4,7	26,6	-152	228	271	78	-18	-161	136	136	-94	
10	34,2	34,2	27,9	9,7	16,9	37,5	-0,146	-0,199	0,004	4,7	27,9	-157	275	323	80	-20	-162	138	134	-142	
11	35,3	35,2	28,1	9,0	16,7	37,9	-0,163	-0,218	-0,013	4,9	28,9	-165	310	357	79	-20	-162	139	137	-171	
12	35,6	35,5	28,4	9,1	17,8	38,6	-0,160	-0,214	-0,012	4,6	29,5	-161	304	348	80	-21	-163	140	140	-169	
13	36,5	36,3	28,6	8,7	16,8	39,0	-0,169	-0,226	-0,013	3,7	30,4	-146	274	325	83	-20	-163	140	132	-153	
14	36,5	36,1	28,9	8,8	17,5	39,7	-0,161	-0,212	-0,030	3,6	30,9	-146	221	277	84	-18	-164	141	126	-98	
15	36,4	36,1	28,8	9,4	19,0	39,6	-0,163	-0,231	-0,020	3,3	30,2	-137	149	203	89	-15	-164	142	125	-34	
16	36,3	35,9	28,8	10,9	23,4	39,5	-0,170	-0,286	-0,021	3,0	28,6	-126	73	124	69	-12	-163	144	124	+32	
17	35,8	35,0	28,7	10,7	26,0	39,2	-0,163	-0,311	-0,034	2,2	28,6	-110	11	44	28	-11	-163	142	141	+81	
18	33,7	31,9	28,5	11,5	26,4	38,9	-0,123	-0,175	-0,080	1,0	27,4	-79	-21	0	0	0	-163	140	142	+91	
19	29,9	28,8	28,8	19,6	29,5	39,5	-0,032	-0,002	-0,064	0,3	19,9	-48	-31	0	0	0	-163	141	132	+72	
20	29,3	28,6	28,5	17,5	27,0	39,0	-0,021	-0,001	-0,046	0,4	21,5	-53	-31	0	0	0	-163	138	132	+83	
21	29,3	29,1	28,4	16,9	26,3	38,7	-0,024	-0,030	-0,016	0,6	21,8	-59	-31	0	0	0	-163	138	132	+89	
22	27,2	27,0	28,3	20,0	26,7	38,4	-0,040	-0,074	-0,019	0,3	18,3	-45	-31	0	0	0	-162	137	132	+78	
23	28,0	28,1	28,2	15,8	24,1	38,2	-0,009	0,007	0,009	0,7	22,4	-62	-31	0	0	0	-162	134	132	+94	
24																					
	30,9	30,4	28,3	13,2	21,1	38,3	-0,057	-0,047	-0,047	1,93	25,13	-2247	1722	2620	800	-194	-3896	3271	3193	+313	

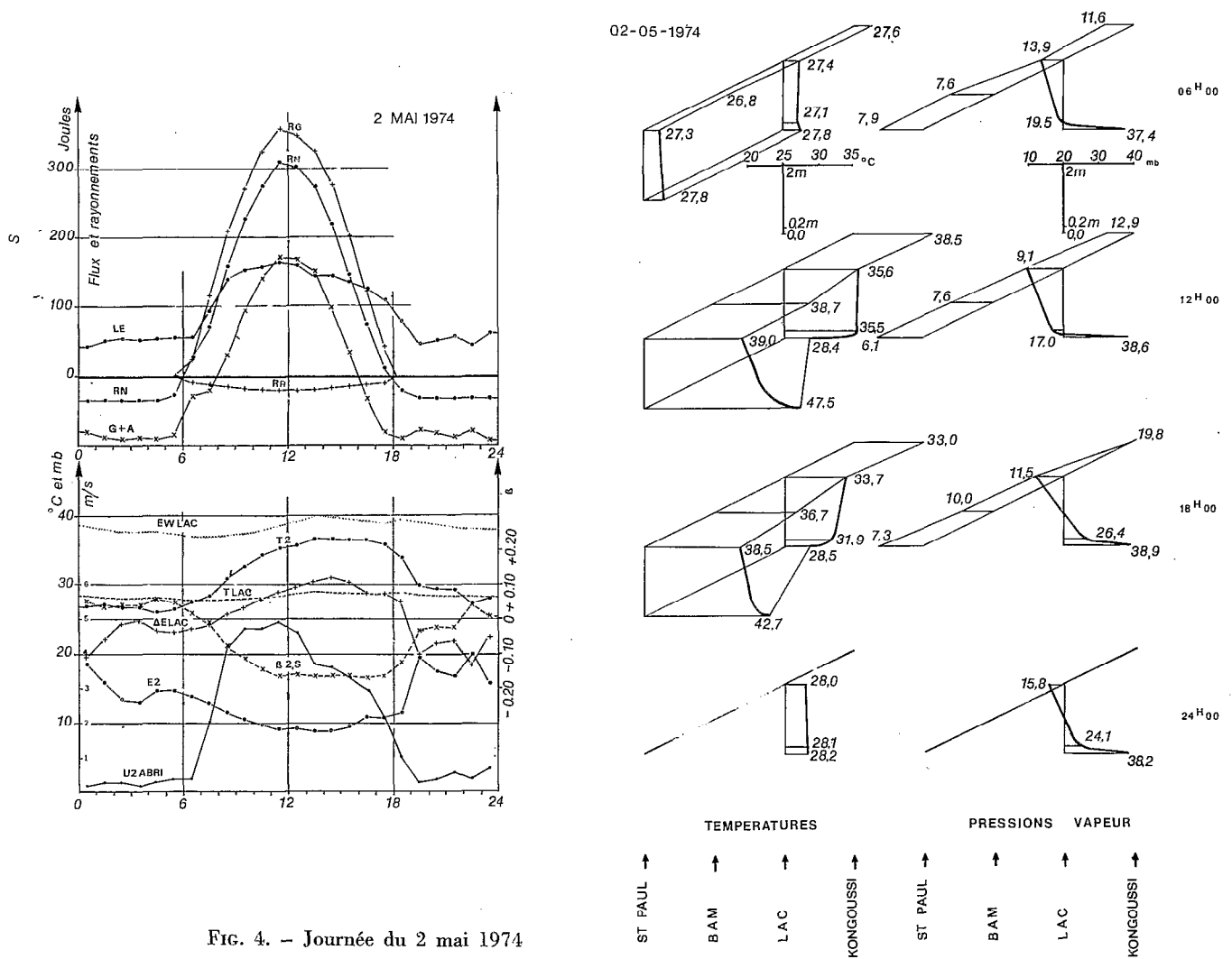


FIG. 4. - Journée du 2 mai 1974

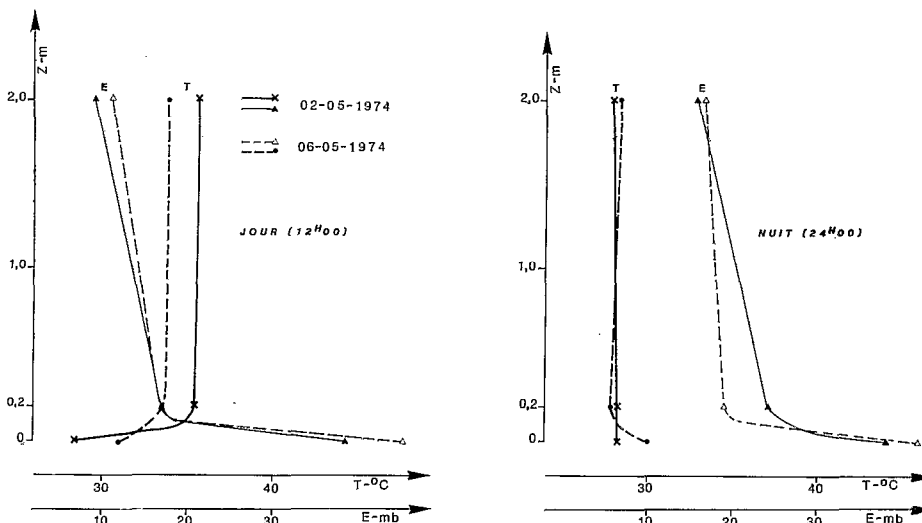


FIG. 5. - Profils de températures et de pression de vapeur d'eau à l'Évapotron - Saison sèche

4.2. La saison des pluies ou « hivernage »

Le 27 août 1975 – Tableau IV – Figure 6

En ce qui concerne d'abord les valeurs moyennes journalières, on constate que la température de l'air (~ 25° C) reste systématiquement très nettement inférieure à la température superficielle du lac (~ 28° C) de plusieurs degrés. Les pressions de vapeur d'eau de l'air (~ 25 mb) restent fortes, induisant des gradients de pressions de vapeur d'eau médiocres (10 à 12 mb). Les vitesses de vent (~ 1,5 m.s<sup>-1</sup>) restent également très moyennes en dehors des épisodes orageux. Les valeurs prises pour le rayonnement net sont aussi très modestes (~ 1 300 J.j<sup>-1</sup>) et la couleur de l'eau très chargée en sédiments conduit à des albedo très élevés (> 10%). L'évaporation résultante reste très faible, voisine des plus mauvaises performances annuelles (~ 5 mm.j<sup>-1</sup>). Le rapport de BOWEN  $\beta$  est systématiquement positif, autour de 0,20.

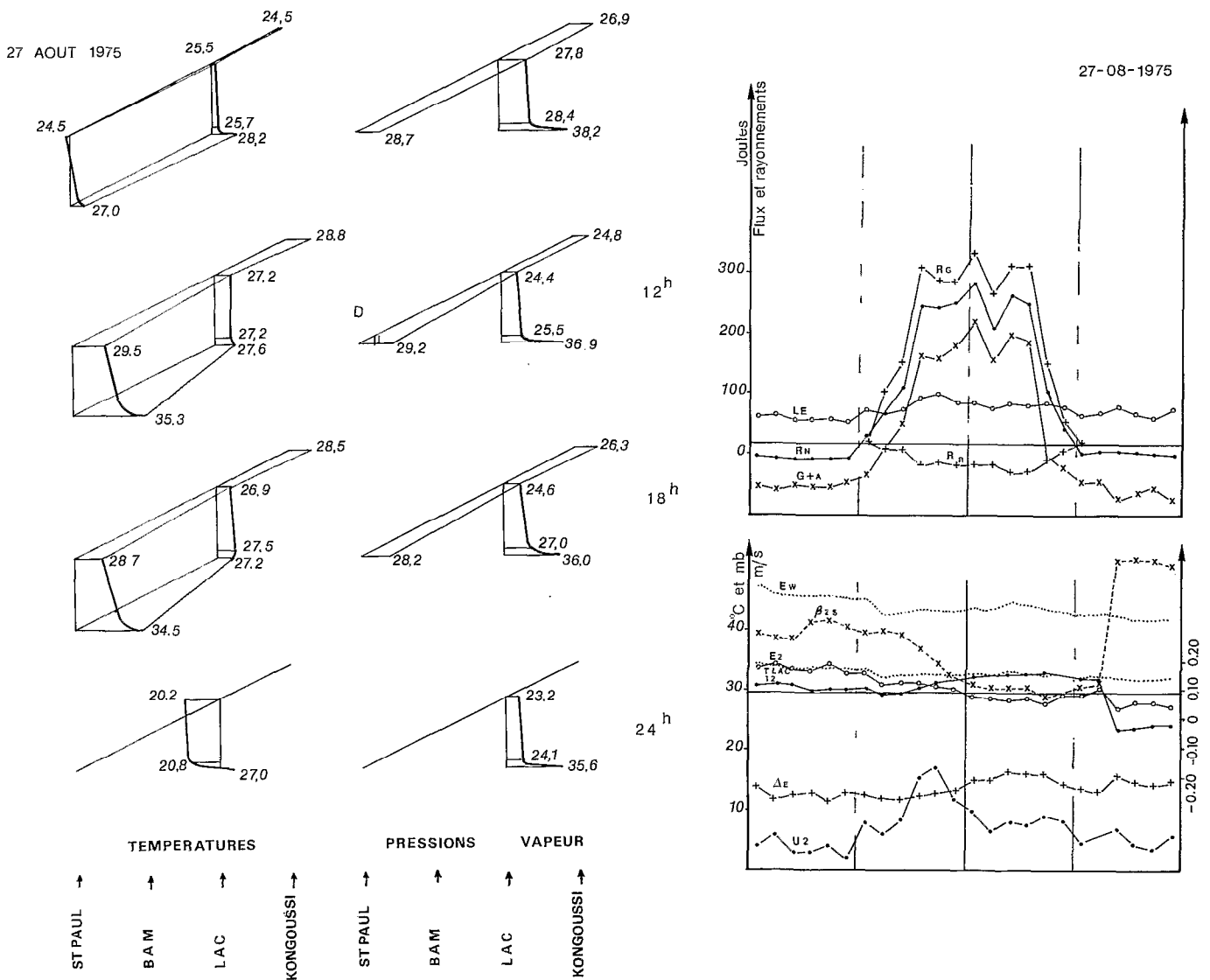


FIG. 6. - Journée du 27 août 1975



TABLEAU IV

27/8/75	T 2	T0,2	TLAC	E2	E0,2	EWLAC	$\beta 2,5$	$\beta 0,25$	$\beta 2,0,2$	U2 ABRI	$\Delta$ ELAC	LE	RN	RG	Rd	aRG	L $\uparrow$	Ra BRUNT	Ra(1-a') BILAN	C + A	
0	26,0	26,5	29,0	28,5	29,6	40,0	0,169	0,156	0,281	0,61	11,5	-37	-17	0	0	0	-164	142	147	60	
1	26,2	26,4	28,5	29,1	29,7	38,9	0,153	0,149	0,212	0,92	9,8	-39	-20	0	0	0	-163	143	143	65	
2	26,0	26,3	28,4	28,2	29,0	38,6	0,150	0,142	0,249	0,44	10,4	-32	-21	0	0	0	-163	142	142	58	
3	25,2	25,7	28,4	28,0	28,9	38,6	0,196	0,180	0,367	0,47	10,6	-33	-21	0	0	0	-163	140	142	61	
4	25,4	26,0	28,4	29,1	30,5	38,6	0,205	0,191	0,289	0,67	9,5	-34	-21	0	0	0	-163	141	142	62	
5	25,3	25,5	28,3	27,7	28,3	38,4	0,182	0,180	0,220	0,28	10,7	-28	-21	0	0	0	-162	140	141	54	
6	25,5	25,7	28,2	27,8	28,4	38,2	0,169	0,166	0,219	1,31	10,4	-47	10	0	0	0	-162	141	172	45	
7	24,5	24,8	27,2	26,1	26,6	36,0	0,178	0,166	0,389	0,94	9,9	-40	42	73	68	-8	-160	137	137	5	
8	24,8	25,3	27,3	26,4	27,5	36,2	0,165	0,148	0,299	1,33	9,8	-46	81	115	108	-8	-160	138	134	-27	
9	25,5	25,9	27,5	26,4	27,3	36,6	0,127	0,112	0,282	2,59	10,2	-64	197	250	143	-34	-161	139	142	-125	
10	26,3	26,9	27,5	25,9	26,5	36,6	0,079	0,071	0,225	2,86	10,7	-69	194	231	162	-27	-161	140	151	-119	
11	26,6	27,2	27,4	25,5	27,0	36,4	0,047	0,014	0,259	1,92	11,0	-58	200	231	151	-31	-160	141	160	-139	
12	27,2	27,2	27,6	24,4	25,5	36,9	0,021	0,023	0	1,61	12,5	-57	230	270	197	-31	-161	141	152	-172	
13	27,3	27,9	27,5	24,1	26,7	36,6	0,010	-0,026	0,146	1,06	12,6	-48	164	212	162	-31	-161	141	144	-115	
14	27,6	28,2	27,9	23,9	26,3	37,5	0,014	-0,017	0,160	1,36	13,6	-56	212	251	143	-42	-161	141	164	-155	
15	27,6	28,1	27,9	24,1	26,4	37,5	0,015	-0,012	0,143	1,22	13,4	-53	200	251	126	-42	-161	142	152	-146	
16	27,9	28,0	27,6	23,5	25,0	36,9	-0,015	-0,022	0,042	1,40	13,4	-58	73	115	97	-23	-161	142	142	-16	
17	27,5	27,4	27,5	24,6	26,1	36,6	0	0,006	-0,04	1,39	12,0	-52	19	31	29	0	-161	142	149	33	
18	26,9	27,5	27,2	24,6	27,0	36,0	0,017	-0,022	0,160	0,72	11,4	-39	-14	0	0	0	-160	141	146	54	
19	26,9	27,2	27,3	25,5	27,2	36,2	0,024	0,007	0,114	0,97	10,7	-42	-11	0	0	0	-160	141	149	54	
20	19,6	20,6	27,2	22,8	24,2	36,0	0,373	0,364	0,451	1,11	13,2	-51	-10	0	0	0	-160	126	150	80	
21	19,9	21,1	26,9	23,2	24,8	35,4	0,374	0,355	0,502	0,69	12,2	-41	-12	0	0	0	-159	127	147	68	
22	20,2	21,4	26,9	23,6	25,0	35,4	0,371	0,344	0,573	0,53	11,7	-36	-14	0	0	0	-159	128	145	63	
23	20,2	20,8	27,0	23,2	24,1	35,6	0,357	0,351	0,446	0,97	12,4	-46	-15	0	0	0	-160	127	145	78	
24																					
	25,2	25,7	27,7	25,7	27,1	37,1	0,141	0,126	0,251	1,14	11,4	-1106	1425	2030	1386	-277	-3866	3323	3538	-164	

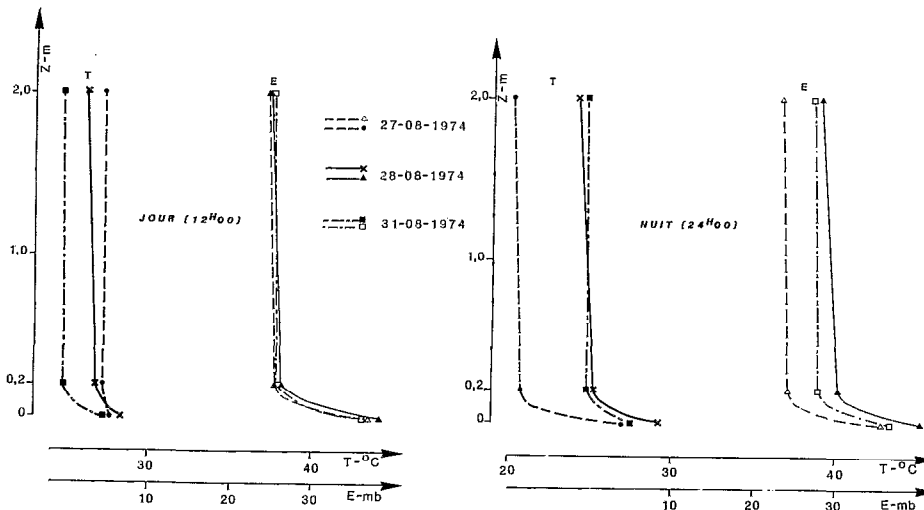


FIG. 7. — Profils de températures et de pression de vapeur d'eau à l'Évapotron — Saison des pluies

Les profils *moyens horaires* types (fig. 7) de températures et de pressions de vapeur d'eau sont très comparables de jour comme de nuit, et il n'est plus possible de différencier par leurs seules formes les profils diurnes et nocturnes.

Les profils thermiques restent remarquablement plats entre les niveaux 0,2 et 2 m, témoins d'une couche d'air faiblement instable dominant une tranche d'air superficielle du lac, plus épaisse, beaucoup plus instable de jour et surtout de nuit, caractérisée donc par un important gradient thermique.

Les profils de pression de vapeur d'eau sont aussi particulièrement plats, interprètes, de nuit comme de jour, d'un flux évaporatoire médiocre.

L'advection latérale est certainement très réduite, les différences de températures entre le lac et son environnement et d'humidité des couches d'air correspondantes étant à cette période à leurs plus bas niveaux.

En dehors des épisodes pluvieux, cette situation climatique se caractérise donc par des températures de l'air relativement fraîches, toujours inférieures aux températures de l'eau du lac, et par des humidités atmosphériques relativement importantes pour ces latitudes sahéliennes.

Les basses couches atmosphériques, relativement fraîches, sont alors au contact d'une surface nettement plus chaude et sont le siège d'une instabilité intense, aussi bien en phase diurne qu'en phase nocturne. Les valeurs de l'évaporation sont modestes, parmi les plus faibles à l'échelle annuelle.

Durant les épisodes pluvieux souvent brefs et brutaux, la température de l'air s'effondre (jusqu'à 15 à 18° C), pendant que s'accroissent considérablement les pressions de vapeur d'eau qui deviennent saturantes et que cesse pratiquement toute évaporation.

#### 4.3. La saison sèche « fraîche »

Le 4 janvier 1976 — Tableau V — Figure 8

Cette appellation recouvre en fait une très longue période qui sépare la fin de l'hivernage (octobre) du début de la saison sèche chaude (mars). Il est cependant possible de dégager une synthèse suffisamment homogène de ces situations climatiques évoluant pourtant sur une longue période.

Au plan des *valeurs moyennes journalières*, les températures journalières s'abaissent progressivement (de 26° C en novembre à 22° C en janvier), et restent presque toujours légèrement inférieures à celles de la surface du lac. Les pressions de vapeur d'eau diminuent elles aussi progressivement (15 à 10 mb) alors que vitesse du vent ( $\sim 1,0 \text{ m.s}^{-1}$ ) et rayonnement net ( $1\,300 \text{ à } 900 \text{ J.j}^{-1}$ ) restent très modestes. La couleur de l'eau du lac s'éclaircit rapidement et l'albédo atteint vite des valeurs caractéristiques de l'eau propre (5 à 7 %). Le rapport de BOWEN,  $\beta$ , conserve des valeurs légèrement positives, oscillant entre 0 et 0,08. Les évaporations sont donc très réduites et atteignent en décembre-janvier les plus faibles valeurs annuelles (moins de  $5 \text{ mm.j}^{-1}$ ).

Comme pour la saison sèche chaude qui lui succède, la saison sèche fraîche montre des profils de températures et d'humidité (fig. 9) témoins de comportements diurnes et nocturnes extrêmement contrastés.

TABLEAU V

A/1/76	T2	T0,2	TLAC	E2	E0,2	EWLAC	$\beta_{2,5}$	$\beta_{0,25}$	$\beta_{2,0,2}$	U2 ABRI	$\Delta$ ELAC	LE	RN	RG	Rd	aRG	L↑	Ra BRUNT	Ra(1-a') BILAN	C+A
0	20,4	20,4	22,2	17,9	19,8	26,6	0,133	0,169	-0,097	0,1	8,8	-25	-19	0	0	0	-149	123	130	+47
1	19,8	19,1	22,0	15,9	17,8	26,4	0,139	0,219	-0,216	0,3	10,5	-33	-19	0	0	0	-149	120	130	+57
2	22,2	21,0	22,0	12,9	15,1	26,4	-0,010	0,059	-0,348	0,6	13,5	-44	-19	0	0	0	-149	121	130	+53
3	22,2	21,8	21,9	14,7	18,9	26,3	-0,011	0,014	-0,044	0,3	11,6	-35	-19	0	0	0	-149	123	130	+54
4	22,6	20,8	21,9	14,8	18,0	26,2	-0,036	0,087	-0,428	0,3	11,5	-35	-19	0	0	0	-149	124	130	+53
5	22,2	20,9	21,9	16,9	19,9	26,3	-0,013	0,112	-0,286	0,4	9,4	-33	-19	0	0	0	-149	125	130	+52
6	21,6	20,8	21,9	18,1	20,4	26,2	-0,022	0,113	-0,262	0,5	8,0	-31	-14	3	3	-3	-149	126	135	+44
7	22,0	21,4	21,9	18,9	20,7	26,2	-0,014	0,054	-0,248	0,5	7,2	-30	+22	35	32	-5	-149	127	141	+8
8	23,7	22,5	22,1	19,3	20,9	26,6	-0,144	-0,049	-0,491	2,3	7,2	-51	76	101	80	-8	-149	130	132	-32
9	24,4	23,0	22,3	19,6	20,9	26,8	-0,195	-0,083	-0,931	2,8	7,2	-56	94	112	95	-7	-150	132	139	-49
10	25,1	23,1	22,4	19,8	20,0	27,1	-0,240	-0,061	-0,707	2,4	7,3	-52	89	140	148	-7	-150	132	106	-49
11	26,8	23,8	22,8	18,9	19,5	27,8	-0,289	-0,076	-1,910	1,9	8,9	-52	107	150	139	-7	-151	135	115	-70
12	28,7	25,7	22,9	17,2	19,2	27,9	-0,348	-0,205	-1,937	2,8	10,7	-68	200	255	70	-10	-151	136	106	-156
13	29,9	26,4	23,3	16,5	18,5	28,6	-0,355	-0,205	-1,329	2,6	12,1	-70	239	242	68	-10	-152	139	159	-194
14	30,0	26,4	23,3	17,0	19,3	28,5	-0,379	-0,219	-1,067	2,1	11,5	-62	114	131	83	-8	-152	139	143	-76
15	29,4	27,1	23,4	17,5	19,7	28,6	-0,351	-0,270	-0,545	1,6	11,2	-54	104	125	59	-10	-152	139	141	-69
16	28,0	27,8	23,6	19,1	19,0	29,0	-0,289	-0,279	-0,406	1,0	9,9	43	4	42	23	-3	-153	138	117	+27
17	26,1	25,6	24,3	21,9	22,8	30,2	-0,141	-0,119	-0,576	0,9	8,3	-38	-20	1	1	-1	-154	137	134	+53
18	25,1	24,3	23,9	21,5	25,0	29,6	-0,097	-0,061	-0,148	0,5	8,0	-31	-23	0	0	0	-153	135	130	+51
19	24,5	23,4	23,4	21,4	23,7	28,7	-0,100	0,002	-0,355	0,2	7,3	-25	-23	0	0	0	-152	134	129	+46
20	23,4	22,8	23,4	21,4	23,0	28,7	0,000	0,064	-0,234	0,2	7,3	-25	-23	0	0	0	-152	131	129	+48
21	22,7	22,2	23,2	21,8	22,8	28,3	0,051	0,115	-0,407	0,3	6,6	-26	-23	0	0	0	-152	131	129	+50
22	22,6	21,9	23,0	19,5	21,6	28,0	0,024	0,100	-0,219	0,5	8,6	-33	-23	0	0	0	-151	129	128	+57
23	22,1	21,4	23,0	18,8	20,1	28,0	0,067	0,133	-0,366	0,2	9,2	-28	-23	0	0	0	-151	127	128	+53
24	24,4	23,1	22,7	18,4	20,3	27,6	-0,109	-0,016	-0,483	1,05	9,24	-978	763	1337	801	-79	-3616	3133	3121	+56

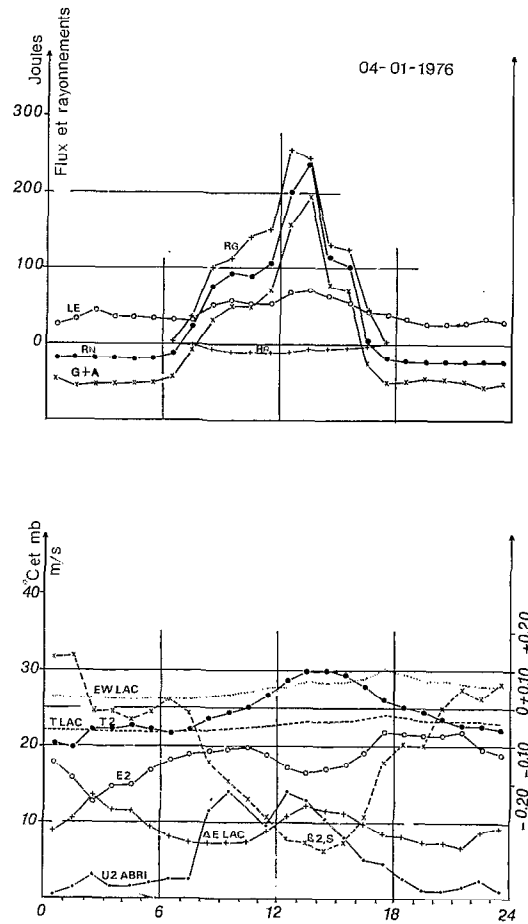
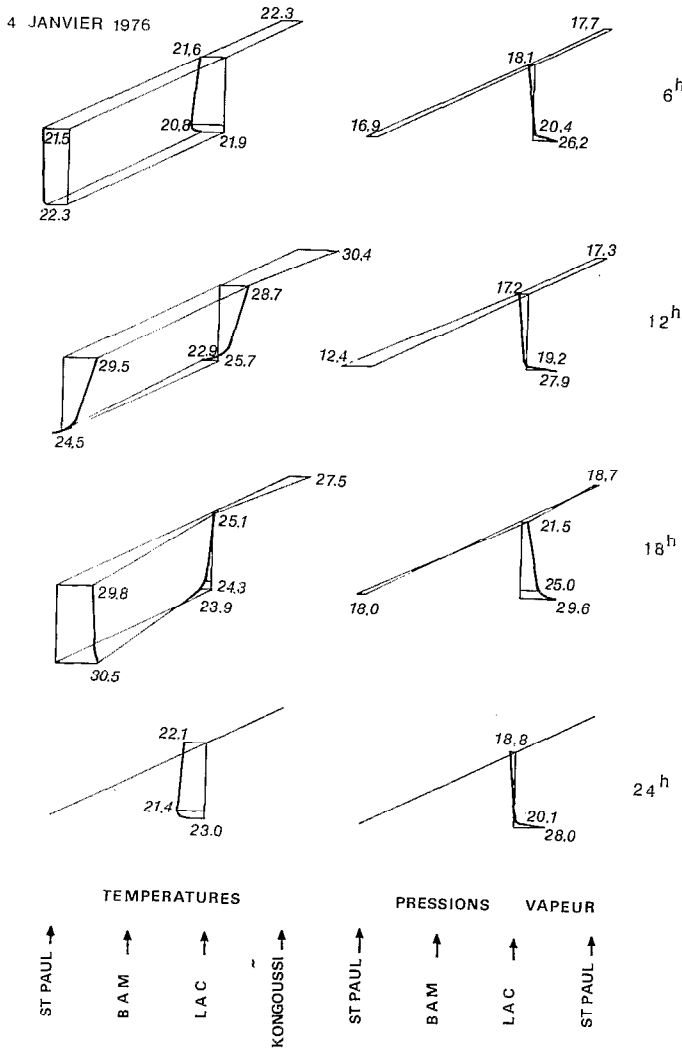


FIG. 8. - Journée du 4 janvier 1976

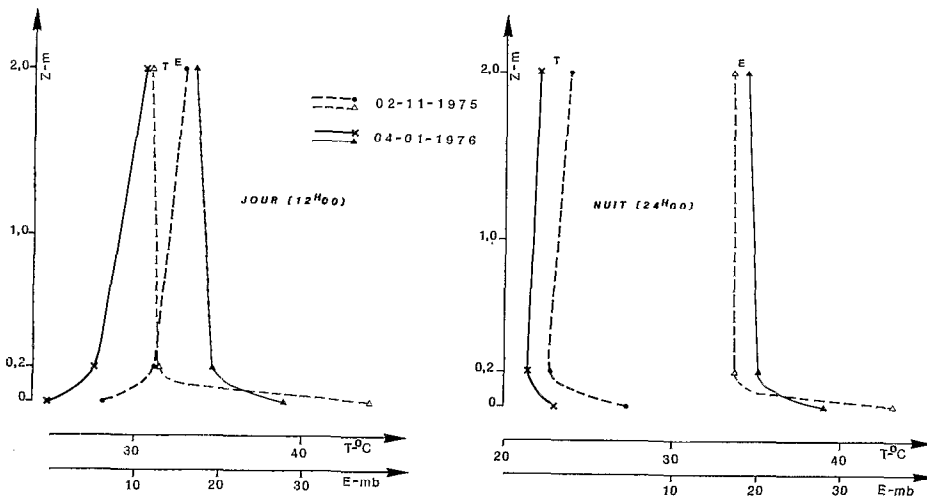


FIG. 9. - Profils de températures et de pression de vapeur d'eau à l'Évapotron - Saison sèche fraîche.

Durant la journée le profil de température fait état d'une stabilité permanente, qui se traduit par des profils thermiques beaucoup plus évasés qu'en saison chaude ; le gradient thermique entre les niveaux 0,2 et 2 m est notamment beaucoup plus important, traduisant une stabilité beaucoup plus forte. Il faut dire que l'instabilité diurne régnant sur les berges est bien moins marquée que celle de saison sèche chaude. Les profils de pression de vapeur d'eau entre ces deux mêmes niveaux sont par contre beaucoup plus faibles et plats qu'en saison chaude, caractéristiques aussi d'une évaporation bien moindre. L'advection diurne, quoique évidemment bien inférieure à celle de saison sèche chaude, joue néanmoins un rôle considérable, compte tenu des faibles niveaux d'échanges énergétiques.

La nuit, s'observent des inversions dans les profils thermiques que l'on peut qualifier de systématiques. Elles traduisent là encore une stabilisation autonome de la tranche d'air supérieure au niveau d'inversion, alliée à des profils de pression de vapeur d'eau extrêmement plats, significatifs d'une évaporation très limitée malgré une advection qui reste encore notable.

La saison sèche fraîche peut donc être caractérisée par une bonne stabilité diurne des couches d'air surplombant le lac, stabilité qui se conserve en phase nocturne, malgré des températures supérieures de la surface du lac, grâce à l'établissement d'un niveau d'inversion thermique systématique. Cette bonne stabilité diurne de la basse atmosphère, qui s'observe aussi sur les sols environnants, souvent plus froids que l'air, caractérise cette période climatique. L'advection latérale reste importante, surtout en cours de journée, sans atteindre bien sûr l'intensité de l'advection de la saison sèche chaude.

Ainsi l'examen détaillé de l'évolution des profils de températures et de pressions de vapeur d'eau de quelques journées types, caractéristiques de ces trois situations climatiques remarquables (et leurs comparaisons) permet de préciser l'évolution des différents contextes climatiques envisageables et leurs conséquences sur l'évaporation du Lac de Bam, représentatif d'une nappe d'eau en zone soudano-sahélienne.

### CONCLUSION GÉNÉRALE

Les deux parties de cet article présentent donc les différentes approches qui permettent l'évaluation de l'évaporation en s'appuyant sur le cas particulier du Lac de Bam. Il faut en fait répondre à trois questions :

1. Évaluer une évaporation, mais laquelle ?  
c'est-à-dire à quelles échelles spatiale et temporelle ?
2. Quelles sont les données de base disponibles ?  
sur la nappe évaporante elle-même (si elle existe) et sur les conditions climatiques régionales.
3. Quelle méthodologie choisir pour satisfaire à la question 1 avec les données disponibles définies en 2 ?

Dans le tableau VI, nous nous sommes efforcés de synthétiser les réponses possibles en tenant compte des deux axes temporel et spatial.

TABEAU VI

		Echelle Temps								
		Instantané	1 heure	1 jour	1 semaine	1 décade	1 mois	1 année	interannuel	
Echelle LOCALE 1 m <sup>2</sup> à Quelques ha		a								
		b								
		c1								
		c2								
		c3								
		c4								
		d1								
		d2								
		d3								
		e1								
e2										
Echelle REGIONALE 1 km <sup>2</sup> à 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>		a								
		b								
		c1								
		c2								
		c3								
		c4								
		d1								
		d2								
		d3								
		e1								
e2										

La signification des codes a à e2 est explicitée ci-dessous :

- a) Bilans hydrologiques sur petites à grandes surfaces évaporantes.
- b) Mesures directes sur bacs évaporatoires et lysimètres et corrélations correspondantes.
- c) Estimation indirecte à partir des transferts de la basse atmosphère.
  - c1. méthode des corrélations turbulentes.
  - c2. méthode du bilan énergétique et du rapport de BOWEN.
  - c3. méthode aérodynamique.
  - c4. méthode combinée : bilan énergétique/méthode aérodynamique.
- d) Approches énergétiques :
  - d1. évaporation « à équilibre »
  - d2. formule de PRIESTLEY TAYLOR
  - d3. formule de PENMAN.
- e) Approches statistiques :
  - e1. corrélations avec des paramètres climatiques,
  - e2. méthode des transferts globaux de masse. Formules de DALTON.

Selon les dimensions spatiales et temporelles du contexte donné où est recherchée l'évaporation, selon les données disponibles et la précision souhaitée, il sera avantageux d'utiliser l'une ou l'autre de ces méthodes.

Manuscrit reçu au Secrétariat des Éditions le 16 décembre 1987.

## BIBLIOGRAPHIE (Parties 1 et 2)

- BEN-ASHER (J), 1981. - Estimating Evapotranspiration from the Sonoita Creek Watershed Near Patagonia, Arizona. *Water Research*, vol. 17, n° 4 : 901-906.
- BILL (R.G.), SUTHERLAND (R.A.), BARTHOLIC (J.F.), CHEN (E.), 1978. - Observations of the convective Plume of a Lake under Cold-Air Adveective Conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 14 : 543-556.
- BOISENCA (S.J.) 1975. - Estimating Energy Budget Components to determine Lake Huron Evaporation, *Water Resources Research*, vol. 11, n° 5 : 661-666.
- BRUTSAERT (W.), YEH (G.T.) 1970. - Implication of a Type of Empirical Evaporation Formula for Lakes and Pans. *Water Resour. Res.*, vol. 6, n° 4 : 1202-1208.
- BRUTSAERT (W) 1982. - Evaporation into the Atmosphere. D. REIDEL Publishing Comp. LONDON. 299 p.
- DE BRUIN (H.A.R.) 1978. - A simple model for shallow lake evaporation. *J. Appl. Meteorol.*, 17 : 1132-1134.
- DE BRUIN (H.A.R.), KEIJMAN (J.Q.) 1979. - The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Netherlands. *J. Appl. Meteorol.*, 18 : 898-903.
- DERFKI (J.A.) 1981. - Operational Estimates of Lake Superior Evaporation Based on I.F.Y.G.L. Findings. *Water Resources Research*, vol. 17, n° 5 : 1453-1462.
- EGGERS (K.A.), TETZLAFF (G.) 1978. - A simple model describing the heat balance of a shallow lake with application to lake Tchad. *Boundary Layer Meteorology*.
- HARBECK (G.E.), Jr, 1962. - A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper. 272-E : 101-105.
- IBIZA (D.), 1972. Mesure de l'évaporation d'un lac en climat sahélien. Lac de Bam. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. IX, n° 3 : 47-64.
- KEIJMAN (J.Q.), KOOPMANS (R.W.), 1973. - A comparison of several methods of estimating the evaporation of Lake Flevo. Symp. *AIHS Helsinki*, Publ. n° 109 : 225-232.
- KOLHER (M.A.), PARMELE (L.H.), 1967. - Generalized Estimates of Free-Water Evaporation. *Water Resources Research*, vol. 3, n° 4 : 997-1005.
- MORTON (F.I.) 1979. - Climatology estimates of lake evaporation. *Water Resources Research*, vol. 15, n° 1 : 64-76.
- MYRUP (L.O.), POWELL (T.M.), GODDEN (D.A.), GOLDMAN (C.R.), 1979. - Climatological estimate of the average monthly energy and water budgets of Lake Tahoe, California-Nevada. *Water Resources Research*, vol. 15, n° 6 : 1499-1508.
- OMAR (M.H.), EL-BAKRY (M.M.), 1981. - Estimation of evaporation from the lake of the ASWAN High Dam (Lake Nasser) based on measurements over the lake. *Agricultural Meteorology*, vol. 23 : 293-308.
- PHILLIPS (D.W.), 1978. - Evaluation of evaporation from Lake Ontario during IFYGL BY A MODIFIED MASS TRANSFER EQUATION. *Water Resour. Res.*, 14 : 197-205.
- POUYAUD (B.), 1979. - Étude de l'évaporation d'un lac en climat soudano-sahélien : le lac de Bam. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol*, vol. XVI, n° 2 : 89-143.

- PRIESTLEY (C.H.B.), TAYLOR (R.J.), 1972. – On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weath. Rev.* 100, 81-92.
- RIOU (Ch.), 1972, 1975. – La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. In : *Mém. ORSTOM* n° 80.
- RODHE (A.), 1973. – Evaporation from Lake Velen estimated from the energy budget. Symp. *AIHS-Helsinki* 1973. Publ. n° 109 : 239-244.
- VIKULINA (Z.A.), 1973. – Evaluation of the Penman method for the computation of evaporation from water bodies using observed data. *Hydrology of Lakes. IAHS*, Publ. 109 : 263-268.
- VUILLAUME (G.), 1981. – Bilan hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XVIII, n° 1 : 23-72.
- WEISMAN (R.N.), BRUTSAERT (W.), 1973. – Evaporation and cooling of a lake under unstable atmospheric conditions. *Water Resour. Res.*, 9 : 1242-1257.