

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE D'ADIOPODOUME (Côte d'Ivoire)

Laboratoire d'Hydrologie

ÉTUDE DE L'ÉVAPORATION D'UN LAC EN CLIMAT
SOUDANO-SAHÉLIEN

LE LAC DE BAM

Rapport provisoire

p a r

B. POUYAUD

SOMMAIRE

BIBLIOGRAPHIE DE L'ETUDE DU LAC DE BAM
LISTE DES SYMBOLES UTILISES.

- I - OBJECTIFS DE L'ETUDE.
- II - RENSEIGNEMENTS GENERAUX SUR LE LAC DE BAM.
- III - DESCRIPTION SOMMAIRE DU DISPOSITIF, ET EXPOSE DE LA METHODE.
 - III.1 - CORRELATIONS entre ELAC et E2, U2, TSURF
 - III.2 - CORRELATIONS entre VENT à St PAUL, et VENT à L'EVAPOTRON
 - III.3 - CORRELATIONS entre OBSERVATIONS sur le LAC et OBSERVATIONS à St PAUL.
 - III.3.1 - RELATIONS entre E2 EVAP et E2 ABRI
 - III.3.2 - RELATIONS entre TCOL, TLAC et TEVAP
 - III.3.2.1 - RELATIONS entre TLAC et TEVAP
 - III.3.2.2 - RELATIONS entre TLAC et TCOL
 - III.3.2.3 - RELATIONS entre TEVAP et TCOL
 - III.3.3 - RELATIONS entre TCOL et TABRI
 - III.3.4 - RELATIONS entre Δ ELAC et Δ E ABRI
 - III.4 - METHODOLOGIE DU CALCUL.
- IV - APPLICATION DE LA METHODE AUX 4 ANNEES D'OBSERVATIONS DE LA STATION SAINT PAUL.
 - IV.1 - VALEURS MOYENNES INTERANNUELLES MENSUELLES
 - IV.2 - VALEURS MOYENNES MENSUELLES 1973-1974-1975-1976
 - IV.3 - VALEURS MOYENNES JOURNALIERES ET HORAIRES.
- V - CONCLUSION.

BIBLIOGRAPHIE "ETUDE DU LAC DE BAM"

- (1) D. IBIZA - Mesure de l'évaporation d'un lac en climat sahélien.
Lac de Bam (premiers résultats)
Cahiers ORSTOM, sér. hydrologie, vol. IX, n° 3, 1972, pp. 45 à 64.
- (2) B. POUYAUD - Etude du lac de Bam - le régime hydrologique.
Document ronéotypé - juin 1975 - 37 p. + graph.
- (3) B. POUYAUD - Etude du lac de Bam - Description d'une installation pour la mesure continue de l'évaporation d'une nappe d'eau libre.
Document ronéotypé - juin 1975 - 38 p. + graph.
- (4) B. POUYAUD
G.J. DUBOIS
P. LEDUC - Etude du lac de Bam - 3 années d'observations du vent à la station climatologique de Saint Paul : 1973-1974-1975.
Document ronéotypé - juillet 1976 - 48 p. + graph.
- (5) B. POUYAUD
G.J. DUBOIS
P. LEDUC - Etude du lac de Bam - observations climatologiques aux stations de Saint Paul, Kongoussi et Bam - année 1973.
Document ronéotypé - 1975, 116 p.
- (6) B. POUYAUD
G.J. DUBOIS
P. LEDUC - Etude du lac de Bam - observations climatologiques aux stations de Saint Paul, Kongoussi et Bam - année 1974.
Document ronéotypé 1976 - 142 p.+ graph.
- (7) B. POUYAUD
G.J. DUBOIS
P. LEDUC - Etude du lac de Bam - observations climatologiques aux stations de Saint Paul, Kongoussi et Bam - année 1975.
Document ronéotypé - 1976 - 138 p.+ graph.
- (8) B. POUYAUD
G.J. DUBOIS
P. LEDUC - Etude du lac de Bam - observations climatologiques aux stations de Saint Paul, Kongoussi et Bam - année 1976.
Document ronéotypé 1977 - 109 p.+ graph.

LISTE DES SYMBOLES UTILISES

ELAC	: évaporation du lac
TSURF	: température superficielle du lac
EW	: tension de vapeur saturante correspondant à TSURF
E2	: tension de vapeur de l'air à 2 m au-dessus du lac
ΔE	: EW - E2
U2	: vitesse du vent à 2 m
EVAP	: évapotron
U2 LAC	: vitesse du vent à 2 m au-dessus du lac
U0, 2 LAC	: vitesse du vent à 0,2 m au-dessus du lac
U2 St PAUL	: vitesse du vent à 2 m mesuré à la station St PAUL
TABRI	: température de l'air sous abri
E2 ABRI	: tension de vapeur de l'air sous abri
TCOL	: température superficielle du COLORADO
EWCOL	: tension de vapeur saturante correspondant à TCOL
ΔE ABRI	: EWCOL - E2 ABRI
TLAC	: température superficielle moyenne du lac
TEVAP	: température superficielle du lac à l'évapotron
E2 EVAP	: tension de vapeur d'eau de l'air à 2 m au-dessus du lac, à l'évapotron
EW EVAP	: tension de vapeur saturante correspondant à TEVAP
ΔE LAC	: EW EVAP - E2 EVAP
U2 ABRI	: vitesse du vent, mesure à 2 m à la station météorologique
Q	: rayonnement net
β	: rapport de Bowen
R_G	: rayonnement global
R_d	: rayonnement diffus
R_R	: rayonnement réfléchi
Lt	: rayonnement de grande longueur d'onde du lac
L \downarrow	: rayonnement atmosphérique
S	: flux de chaleur cédé par le système lac/air
ϵ	: émissivité de l'eau
σ	: constante de PLANCK
T AIR	: température de l'air à 2 m au-dessus du lac, à l'évapotron.

I - OBJECTIFS DE L'ETUDE.

La connaissance précise de l'évaporation d'une grande étendue d'eau libre en zone soudano-sahélienne est indispensable à l'élaboration de grands projets d'aménagements. La hauteur d'eau évaporée demeure souvent le paramètre hydrologique déterminant dans le bilan des retenues érigées dans les vallées dont le relief ne permet que rarement de s'assurer d'une profondeur suffisante. L'étude de l'évaporation, à diverses échelles de temps (annuelle, mensuelle, journalière), permet seule une première approche de la connaissance de l'Evapotranspiration Potentielle, préalable à tout aménagement hydro-agricole important.

Le lac de Bam, objet de l'étude, présente l'avantage d'autoriser, environ 9 mois sur 12, une mesure directe de l'évaporation, en suivant chaque jour les variations limnimétriques. En effet, exceptée la période de l'hivernage (juillet à septembre), les apports et les infiltrations sont négligeables.

Sans nier au rayonnement solaire son rôle de moteur primordial de tous les phénomènes climatiques, nous concevons avant tout l'évaporation sous son aspect de phénomène de diffusion. Ainsi l'évaporation ELAC d'une nappe d'eau libre sera donc entièrement déterminée par sa température de surface TSURF (et la tension de vapeur saturante correspondante $E W$), et le profil de tension de vapeur d'eau de l'air surplombant, que nous pouvons caractériser par E_2 , tension de vapeur d'eau à une hauteur caractéristique (2 m). Ces deux grandeurs se trouvent intégrées par le déficit de saturation $\Delta E = E W - E_2$. Le vent, à cette hauteur caractéristique U_2 intervient en déterminant la forme du profil de tension de vapeur entre EW et E_2 , par le remplacement plus ou moins rapide des couches d'air chargées d'humidité par de l'air sec venu des alentours du lac, induisant dans la couche limite un gradient de tension de vapeur d'autant plus grand, que la vitesse du vent est plus élevée.

L'énergie nécessaire à ce changement d'état (243 Joules pour évaporer 1 mm d'eau par cm^2 de nappe), provient d'un apport extérieur au système (rayonnement solaire et atmosphérique flux thermique du sol), d'une diminution du stock calorifique de l'ensemble par refroidissement de l'air ou de l'eau, ou encore de phénomènes d'advection provoqués par les fortes différences de températures entre la nappe d'eau et les sols alentour du lac.

Dans cette schématisation, et pour ce régime climatique, le facteur limitant de l'évaporation est donc le déficit de saturation de l'air, et non l'énergie, toujours disponible en quantité suffisante pour évaporer tout ce que l'état d'humidité de l'air surplombant permet.

L'expérimentation de Bam a montré la justesse de cette hypothèse simple.

Il suffit alors de relier ces grandeurs physiques, propres au micro-climat du lac, aux observations classiques réalisées sous abri météorologique par des corrélations étroites pour pouvoir estimer l'évaporation d'une retenue ou l'ETP d'une culture bien irriguée, à partir de données météorologiques existantes.

II - RENSEIGNEMENTS GENERAUX SUR LE LAC DE BAM.

Situé à 100 km au Nord de Ouagadougou, le lac de Bam s'étend sur une vingtaine de kilomètres en moyennes eaux, sans dépasser une largeur de plus d'un kilomètre ; il épouse les formes du lit d'un "affluent très épisodique" de la Volta Blanche. Orienté Nord-Sud, il est donc perpendiculaire aux vents dominants de secteur Est à Nord-Est (Harmattan). Sa profondeur est faible (quelques mètres) et remarquablement constante. Les fonds remontent parfois, là où les apports de petits affluents sont particulièrement importants, provoquant en basses eaux le morcellement du lac en une chaîne de mares, bien avant son assèchement qui est déjà intervenu 6 fois depuis 1927.

Le bassin versant drainé est de 2.600 km², dont plusieurs zones se révèlent endoréiques, parfois plusieurs années successivement. Les déversements ne sont pas rares, mais sont devenus plus difficiles après le rehaussement artificiel récent du seuil naturel.

L'infiltration est extrêmement réduite, en dehors de très hautes eaux où le lac s'étend sur des zones non colmatées. Il ne semble pas d'ailleurs y avoir de liaisons entre le lac et les nappes exploitées par puits profonds (10 à 20 m) à la périphérie du lac.

Un rapport de synthèse sur le régime hydrologique du lac existe (2) complétant les premiers résultats publiés par D. IBIZA dans Cahiers de l'ORSTOM (1).

Le climat est celui, classique, de la zone sahélo-soudanienne. La pluviométrie annuelle varie de 400 à 700 mm du Nord au Sud du bassin versant groupée sur les mois de juin à septembre. Cette saison des pluies est précédée par une saison chaude et humide en avril-mai. Après l'hivernage, la saison sèche s'installe progressivement d'octobre à mars, caractérisée par des nuits fraîches et la présence constante d'un vent d'harmattan sec et chaud. Des renseignements climatiques généraux ont été publiés (4) (5) (6) (7).

III - DESCRIPTION SOMMAIRE DU DISPOSITIF, ET EXPOSE DE LA METHODE.

Un dispositif expérimental important a été mis en place progressivement autour du lac de Bam. La partie proprement hydrologique est décrite dans le rapport (2) :

- 3 stations météorologiques complètes ont été successivement installées, les 2 premières à proximité du lac, la troisième à l'Est, suffisamment éloignée pour ne pas être perturbée par le micro-climat du lac est celle de SAINT PAUL, qui nous servira de station de référence,
- 1 station complète était enfin érigée sur un bâti métallique placé au milieu du lac, avec un anneau de garde suffisant. Elle est décrite dans une publication (3) et porte le nom d'évapotron (EVAP).
On y enregistre de début 1973 à fin 1975, avec quelques courtes interruptions dues à des pannes, les différents rayonnements (net, global, diffus, réfléchi), les températures sèches et humides de l'air à deux niveaux (0,20 m et 2,00 m), les vitesses de vents aux mêmes deux niveaux, et un profil de température de la surface du lac à 2 m de profondeur. Le pas de temps du dépouillement est la demi-heure, il fournit pour chaque journée 24 valeurs moyennes horaires des différents paramètres retenus.

Le dépouillement, particulièrement lourd, mais exhaustif, a été effectué pour 40 journées réparties sur 4 décades caractéristiques appartenant à des périodes où la mesure directe de l'évaporation est possible (1 - 10/11/75 ; 1 - 10/12/75 ; 27 - 31/12/75 ; 1 - 5/1/76 ; 1 - 10/5/74). Il est possible ainsi, pour ces journées de "décortiquer" heure par heure le phénomène évaporatoire, et d'étendre les résultats obtenus aux autres périodes, pour y calculer l'évaporation.

III.1 - CORRELATIONS ENTRE ELAC ET E2, U2, TSURF.

En considérant les moyennes pendataires de ces paramètres climatiques, mis en relation avec les valeurs observées limnimétriques de l'évaporation pour ces pentades, on peut établir de bonnes corrélations entre l'évaporation et les moyennes des paramètres retenus.

En effet, s'il est difficile de mesurer avec précision directement au jour le jour l'évaporation (phénomènes de seiches périodiques dues au vent), la valeur moyenne sur 5 jours peut être jugée suffisamment précise.

Ces 8 pentades nous ont fourni les valeurs moyennes suivantes pour les paramètres retenus :

	E2 mm Hg	TSURF °C	ΔE mm Hg	U2 m/s	ELAC mm/j
1 - 05.05.74	12,1	28,8	27,5	1,50	9,3
6 - 10.05.74	18,3	29,2	22,4	2,07	8,1
1 - 05.11.75	15,1	27,0	20,6	1,01	7,0
6 - 10.11.75	14,4	26,5	20,2	0,92	6,4
1 - 05.12.75	13,2	24,5	17,6	1,04	5,8
6 - 10.12.75	11,6	23,6	17,4	1,34	5,9
27 - 31.12.75	11,2	22,5	16,1	1,21	5,5
1 - 05.01.76	15,0	22,9	12,9	1,03	4,4

- E2 : tension de vapeur d'eau à 2 m au-dessus du lac
- TSURF : Température superficielle du lac
- EW : tension de vapeur saturante correspondant à TSURF
- ΔE : déficit de saturation EW - E2
- U2 : vitesse du vent 2 m au-dessus du lac
(en réalité valeur mesurée à St Paul, cf. III.2)
- ELAC : évaporation moyenne journalière mesurée à l'échelle limnimétrique.

La formule de Dalton s'explique classiquement sous une forme :

$$E \text{ LAC} = f (U2) \cdot \Delta E \quad \text{avec} \quad f (U2) = a + b \cdot U2$$

Une corrélation multivariable conduite avec les 8 triplets (ΔE, U2, ELAC), sous une forme multilinéaire fournit la relation :

$$(a) \quad ELAC = 0.395 + (0,276 + 0,0327 \cdot U2) \cdot \Delta E$$

le coefficient de corrélation est très correct : $r = 0.9971$

le terme constant 0.395 est évidemment peu satisfaisant, mais doit être considéré comme un résultat artificiel des calculs menés, traduisant notamment peut-être la mauvaise qualité du psychromètre qui sous-estimerait systématiquement ΔE.

L'ajustement, conduit sous une forme puissance, fournit la relation :

$$(b) \text{ ELAC} = 0,398 \cdot \Delta E^{0,9335} \cdot U_2^{0,1374}$$

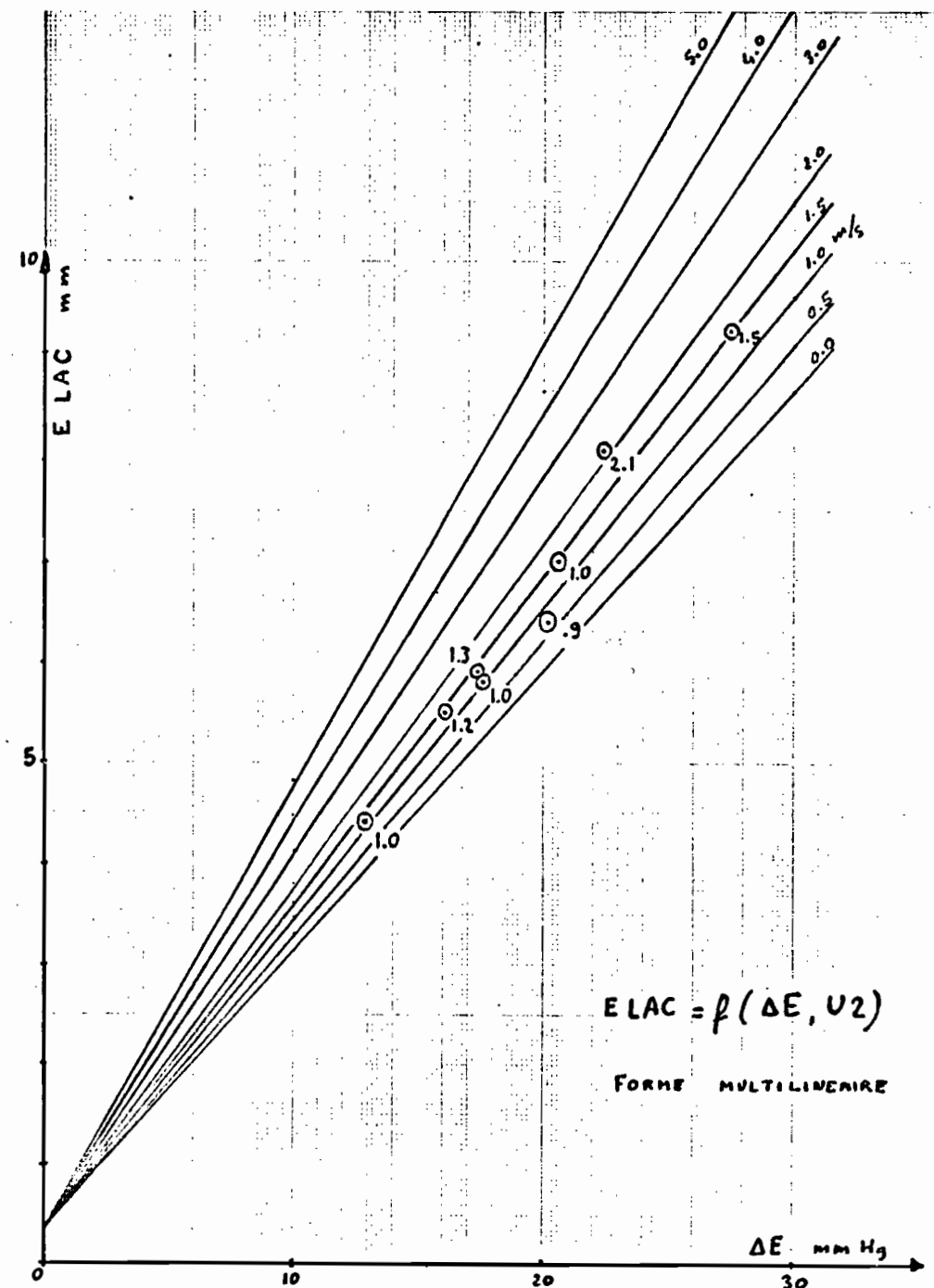
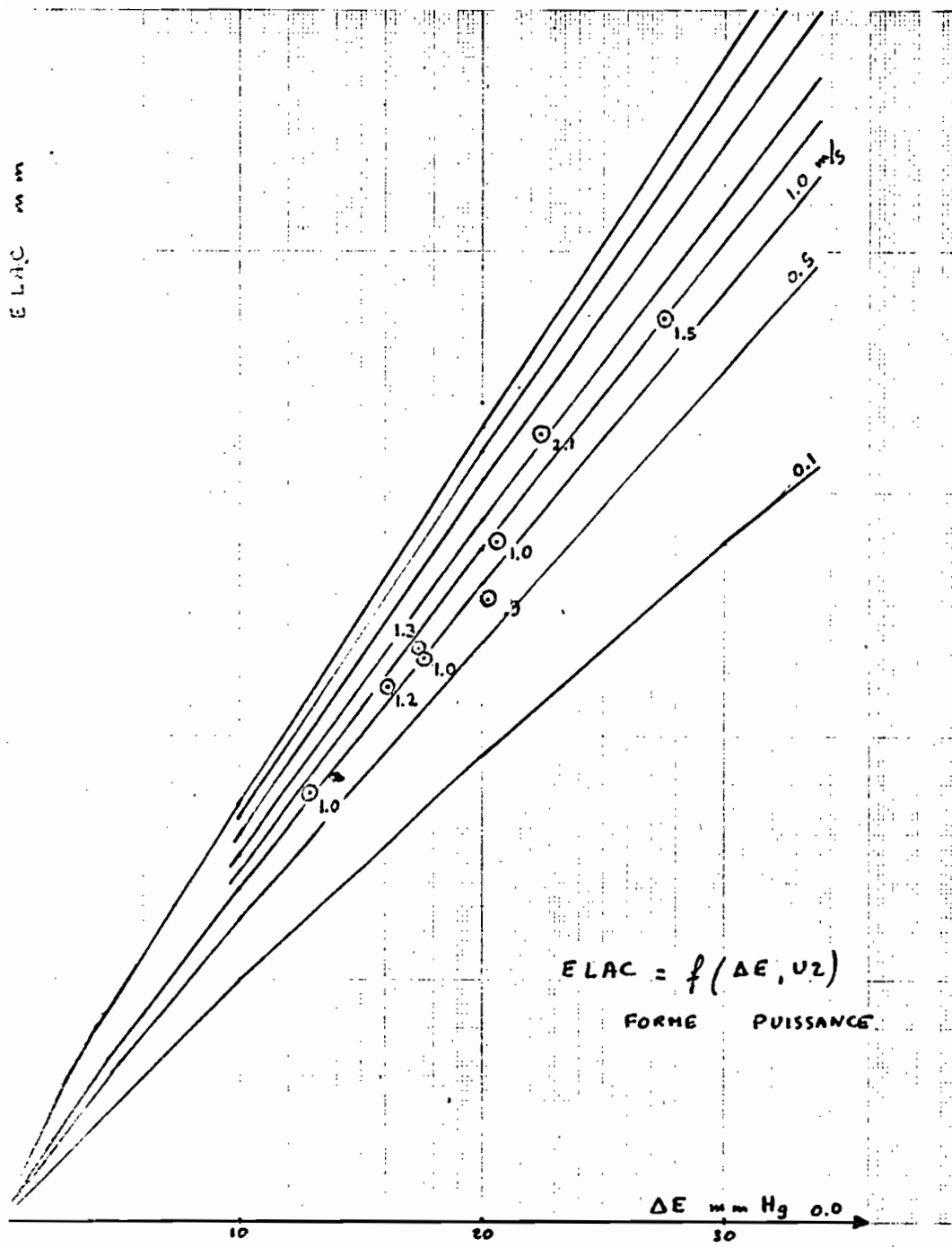
le coefficient de corrélation est aussi très satisfaisant :
 $r = 0.9985$

ΔE	U2	E LAC	
		(a)	(b)
10	0.0	3,13	
10	0.1		2,50
10	0.5	3,30	3,12
10	1.0	3,47	3,43
10	1.5	3,62	3,62
10	2.0	3,80	3,77
10	3.0	4,12	3,99
10	4.0	4,47	4,15
10	5.0	4,82	4,28
20	0.0	5,85	
20	0.1		4,78
20	0.5	6,22	5,96
20	1.0	6,55	6,56
20	1.5	6,86	6,93
20	2.0	7,20	7,21
20	3.0	7,87	7,63
20	4.0	8,53	7,93
20	5.0	9,18	8,18
30	0.0	8,7	
30	0.1		6,98
30	0.5	9,15	8,71
30	1.0	9,65	9,58
30	1.5	10,1	10,1
30	2.0	10,6	10,5
30	3.0	11,6	11,1
30	4.0	12,6	11,6
30	5.0	13,6	12,0

Evaporation calculée par (a) ou (b)
 pour quelques valeurs caractéristiques de $\Delta 2$ et U2

Les deux ajustements sont donc très proches pour les vitesses moyennes de vent habituelles, de 0.5 à 2.5 m/s.

Ces relations, établies pour des valeurs moyennes pentadaires conservent leur valeur pour des valeurs moyennes journalières, décadaires et mensuelles, ainsi que nous verrons ultérieurement. L'application à des valeurs moyennes horaires, nécessite un réajustement proportionnel à la valeur journalière.



III.2 - CORRELATIONS ENTRE VENT A SAINT PAUL, ET VENT A L'EVAPOTRON.

De bonnes corrélations ont été obtenues entre les vitesses de vent à 0,20 m et 2.0 m, mesuré à l'évapotron. Au cours de la première décade de mai 1974 où l'on observe par exemple :

$$(c) \quad U2 \text{ LAC} = 1.15 \times U 0,2 \text{ LAC}$$

avec un coefficient de corrélation $r > 0.95$

U 2 LAC : vitesse du vent à 2,0 m

U 0,2 LAC : vitesse du vent à 0.2 m

Les corrélations entre U2 LAC et U2 St PAUL sont un peu moins satisfaisantes :

Pour la même période (1.10/5/74) nous avons obtenu :

- entre les 2 x 10 valeurs moyennes journalières

$$(c1) \quad U2 \text{ LAC} = 0.664 \cdot U2 \text{ St PAUL} + 1.03$$

avec $r = 0.924$

- entre les 2 x 10 x 24 valeurs moyennes horaires du 1er au 10.5.74

$$(c2) \quad U2 \text{ LAC} = 0.755 \cdot U2 \text{ St PAUL} + 0.857$$

avec $r = 0.83$

En fait, la corrélation évolue en cours d'année, avec notamment l'orientation du vent. Nous avons par ailleurs enregistré de nombreuses pannes des anémomètres sophistiqués installés sur l'évapotron.

A la lumière de divers essais effectués sur le lac, il apparaît que le site de l'évapotron n'est pas absolument représentatif de l'ensemble du lac puisque certaines directions du vent sont privilégiées par l'orientation des bras du lac et la situation des rideaux d'arbres situés sur la bordure pourtant éloignée de 300 m. Par contre, la situation extrêmement bien dégagée de la station St Paul fait qu'il nous paraît logique de préférer les observations du vent à cette station (anémographe LAMBRECHT) plutôt qu'à l'évapotron, ce qui allie les avantages d'une meilleure représentativité à une meilleure continuité.

Donc, U_2 , sans précision, signifiera partout : vitesse moyenne du vent à 2 m, mesuré à la station St Paul pour la période considérée, et sera utilisé comme valeur représentative du vent sur le lac.

III.3 - CORRELATIONS ENTRE OBSERVATIONS SUR LE LAC ET OBSERVATIONS A St PAUL.

Nous venons de mettre en évidence une corrélation serrée entre l'évaporation du lac et quelques paramètres climatologiques de l'air surplombant le lac (U_2 et ΔE). Nous avons retenu pour U_2 la valeur observée à St Paul.

Si nous voulons maintenant déterminer l'évaporation du lac à partir de paramètres climatologiques classiques observés à la station de St Paul jugée représentative du climat régional, il nous faut établir de bonnes corrélations entre le paramètre climatique LAC considéré et les observations à St Paul correspondantes, où l'on dispose entre autres d'un abri météo et d'un bac d'évaporation enterré de type COLORADO. Les paramètres intéressants de la station St Paul seront donc les valeurs moyennes journalières suivantes :

- TABRI : température moyenne de l'air sous abri
- E2 ABRI : tension moyenne en vapeur d'eau de l'air sous abri
- TCOL : température moyenne superficielle du COLORADO
- EW COL : la tension de vapeur saturante correspondante à TCOL
- ΔE ABRI = E2 ABRI - EW COL : le déficit de saturation correspondant

TABRI, E2 ABRI et TCOL sont obtenus par une moyenne pondérée des observations à 6, 12 et 18 heures.

Les paramètres caractéristiques du lac sont :

- TLAC : température moyenne superficielle mesurée 3 fois par jour (6, 12, 18 h.) depuis une pirogue en 3 emplacements successifs.
- TEVAP : température moyenne superficielle du lac, mesurée en continu et enregistrée à proximité de l'évapotron
- E2 EVAP : tension en vapeur d'eau de l'air surplombant le lac (2 m) en continu
- EW EVAP : tension de vapeur saturante correspondant à TEVAP
- ΔE LAC = EW EVAP - E2 EVAP

III.3.1 - RELATIONS ENTRE E2 EVAP ET E2 ABRI.

Nous avons calculé pour les 8 couples de valeurs pentadaires de E2 EVAP et E2 ABRI la droite de régression correspondante.

E2 EVAP	12.1	18.3	15.1	14.4	13.2	11.6	11.2	15.0
E2 ABRI	9.1	17.7	11.6	12.2	9.4	9.3	8.5	12.2
	1. 5/5/74	6.10/5/74	1.5/11/75	6.10/11/75	1.5/12/75	6.10/12/75	27.31/12/75	1. 5/1/76

La corrélation est bonne pour l'éventail des valeurs prospectées :

$$(d) \quad E2 \text{ EVAP} = 0.7530 \cdot E2 \text{ ABRI} + 5.391$$

le coefficient de corrélation est satisfaisant : $r = 0.9621$

La corrélation établie sur la totalité des 40 valeurs moyennes journalières est un peu moins bonne :
 $(E2 \text{ EVAP} = 0.7309 \cdot r = 0.8926) E2 \text{ ABRI} + 5.645$
 et nous lui avons préféré celle établie sur 8 valeurs pentadaires.

III.3.2 - RELATIONS ENTRE TCOL, TLAC ET TEVAP.

III.3.2.1 - RELATIONS ENTRE TLAC ET TEVAP.

Nous avons 3 décades d'observations communes dépouillées
 1 - 10/11/75 ; 1 - 10/12/75 ; 27/12/75 - 5/1/76

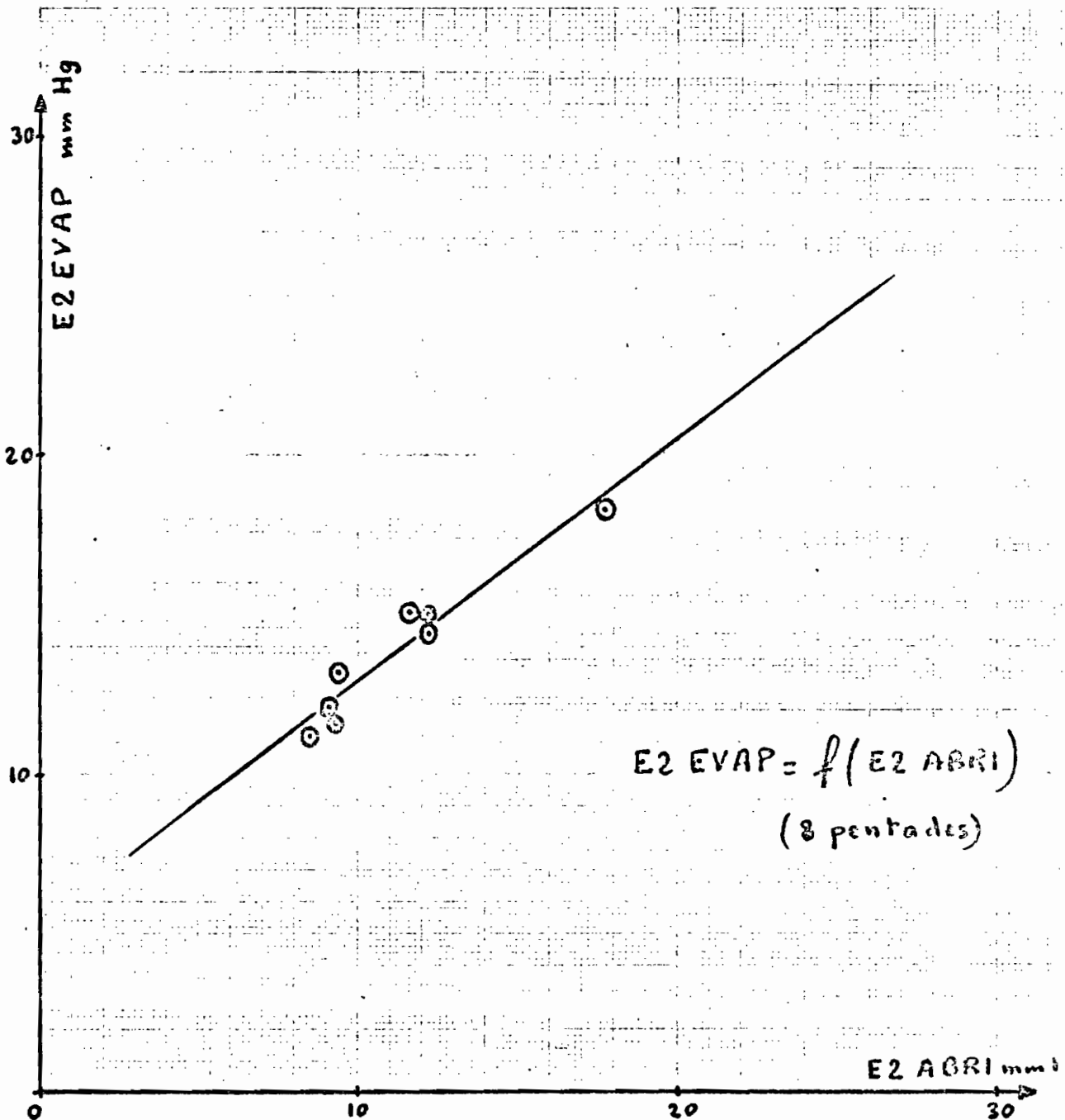
TEVAP est obtenue comme moyenne journalière de 24 moyennes horaires de la température superficielle du lac à l'emplacement de l'évapotron.

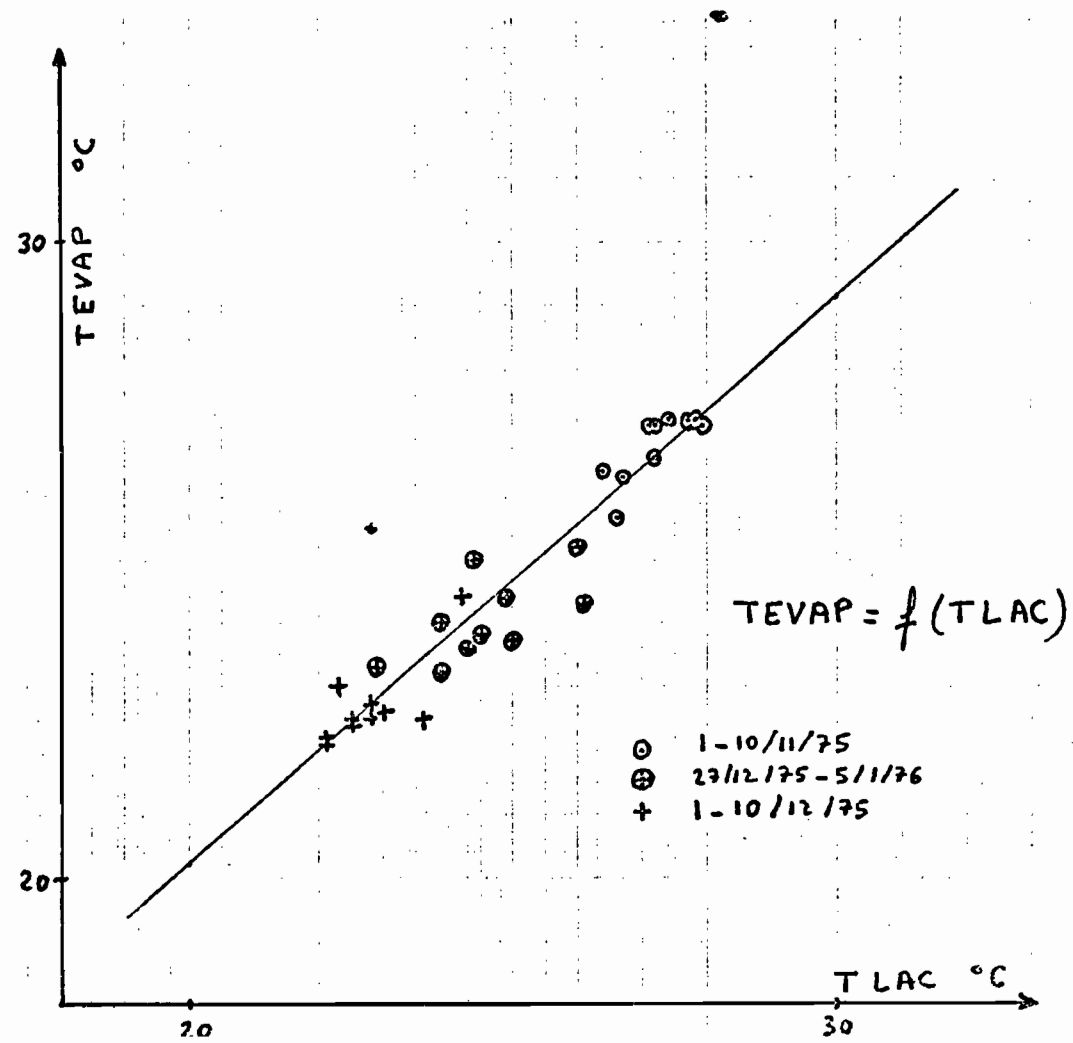
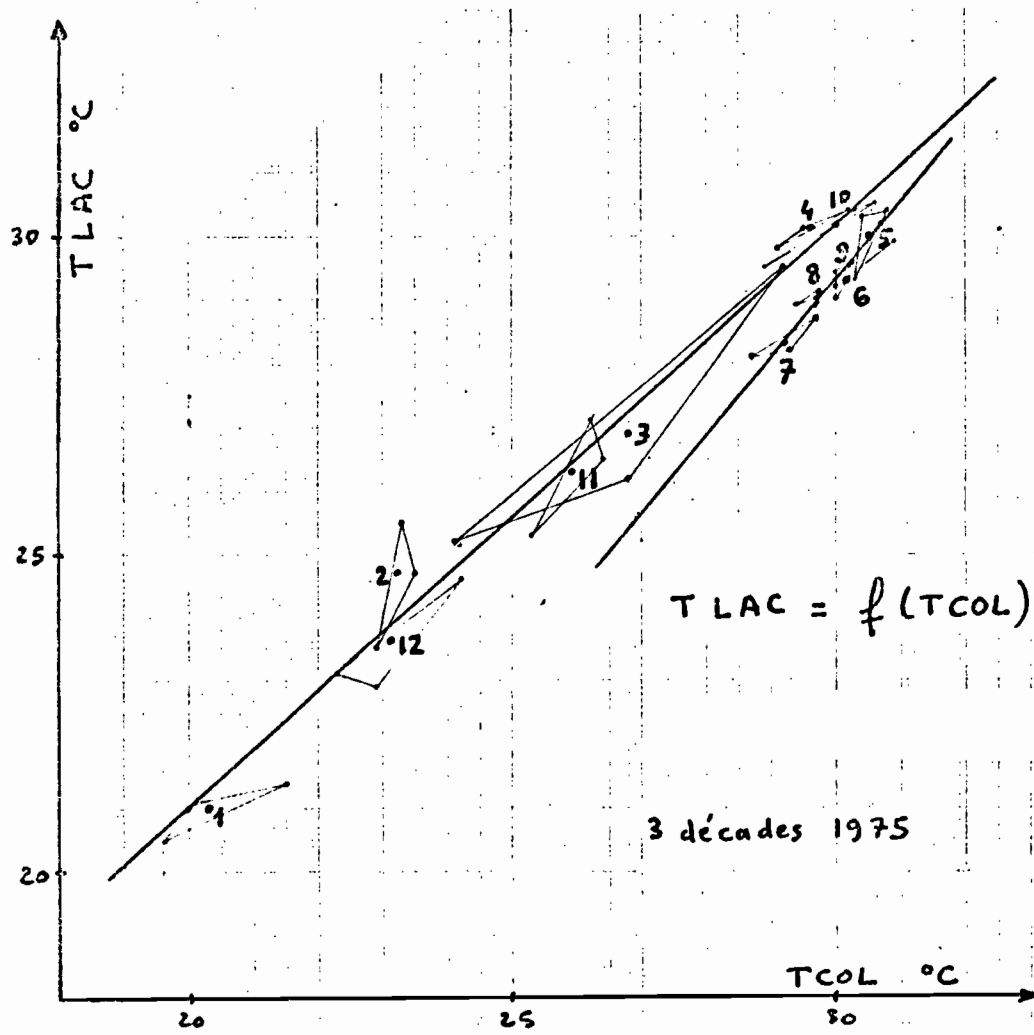
TLAC est obtenue comme moyenne journalière pondérée de trois observations journalières à 6, 12 et 18 heures, en 3 emplacements successifs pour chaque mesure.

La droite de corrélation correspondant aux 2 x 30 valeurs moyennes journalières est :

$$(e) \quad TEVAP = 0.8904 \cdot TLAC + 2.371$$

avec un coefficient de corrélation $r = 0.9615$ satisfaisant.





III.3.2.2 - RELATIONS ENTRE TLAC et TCOL.

Pour ces deux paramètres, nous disposons des observations faites en 1975, dépouillées en totalité, décades par décades, soit 12 couples de valeurs mensuelles ou 36 couples de valeurs décadaires.

TLAC	21.0	24.7	26.9	30.1	30.0	29.3	28.3	29.1	29.5	30.1	26.3	23.6
TCOL	20.3	23.3	26.8	29.6	30.5	30.2	39.2	29.8	30.2	30.0	25.9	23.1
Année 1975	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.

L'examen de ces couples montre que ces valeurs s'organisent selon deux droites de régression distinctes, pour les mois de saison sèche (octobre à avril) et les mois d'hivernage (mai à septembre) :

$$- \quad (f1) \quad TLAC = 0.9257 \cdot TCOL + 2.441 \quad r = 0.9930$$

valable d'octobre à avril

$$- \quad (f2) \quad TLAC = 1.214 \cdot TCOL - 7.164 \quad r = 0.9786$$

valable de mai à septembre

Nous avons écarté la corrélation unique pour les 12 mois, moins satisfaisante :

$$TLAC = 0.8367 \cdot TCOL + 4.482 \quad r = 0.9862$$

III.3.2.3 - RELATIONS ENTRE TEVAP et TCOL.

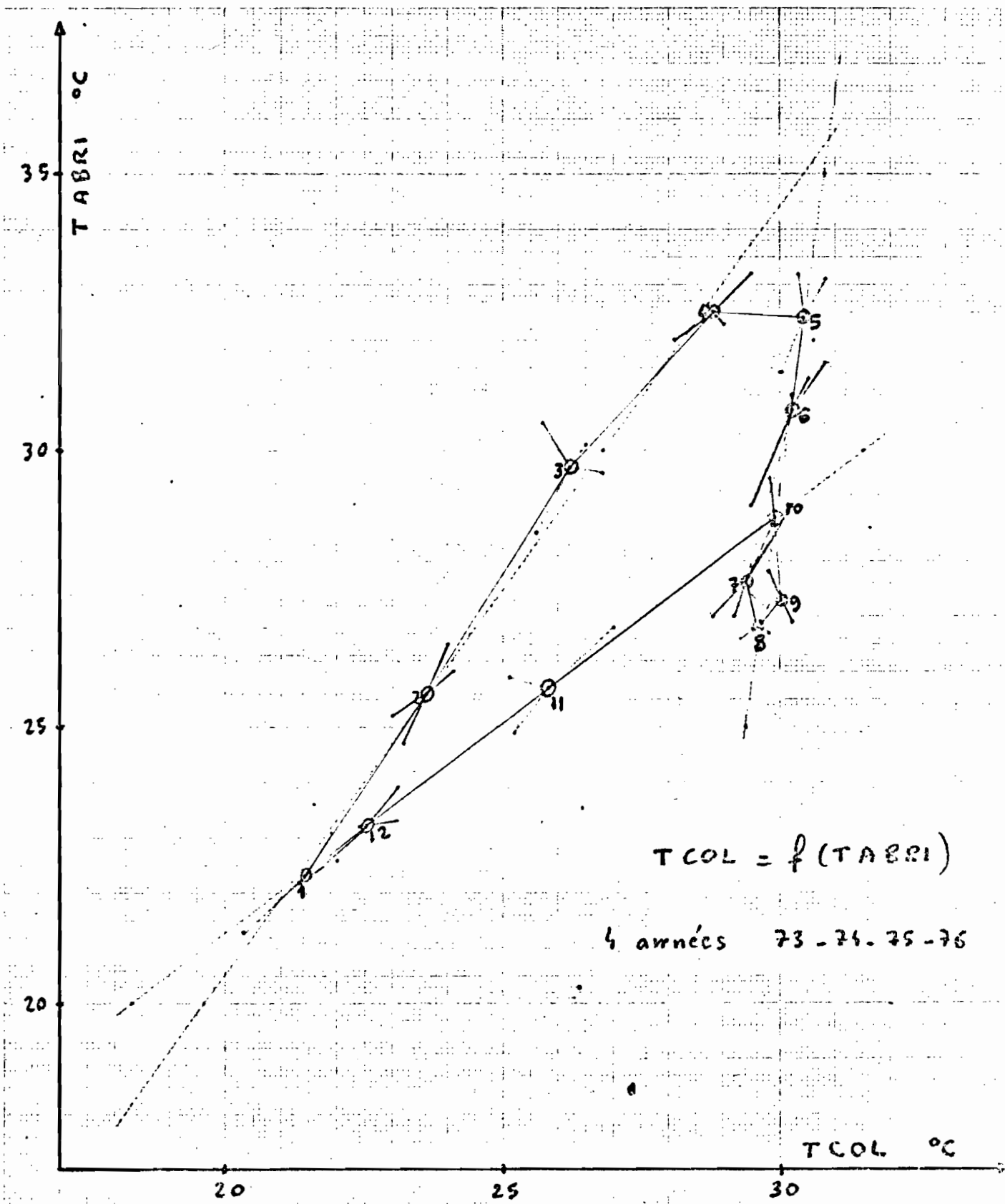
Les relations (e), (f1) et (f2) permettent d'obtenir :

- d'octobre à avril

$$(g1) \quad TEVAP = 0.8242 \cdot TCOL + 4.614$$

- de mai à septembre

$$(g2) \quad TEVAP = 1.081 \cdot TCOL - 4.008$$



III.3.3 - RELATIONS ENTRE TABRI et TCOL.

Toutes les stations météo n'étant pas équipées d'un bac Colorado, il peut être intéressant de connaître les corrélations entre la température moyenne sous abri et la température moyenne superficielle d'un Colorado sous sol nu.

Nous disposons de 4 années d'observations soit 48 couples de valeurs moyennes mensuelles ou 12 couples de valeurs moyennes mensuelles interannuelles.

TABRI	22.3	25.6	29.7	32.5	32.4	30.7	27.6	26.8	27.3	28.9	25.7	23.2
TCOL	21.4	23.6	26.2	28.8	30.4	30.2	29.4	29.6	30.0	29.9	25.8	22.5
Moyennes interannuelles 73, 74, 75, 76	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.

Ces doublets s'organisent selon trois droites de régression, selon la période de l'année considérée :

- janvier à avril

$$(h1) \quad TCOL = 0.7112 \cdot TABRI + 5.424 \quad r = 0.9967$$

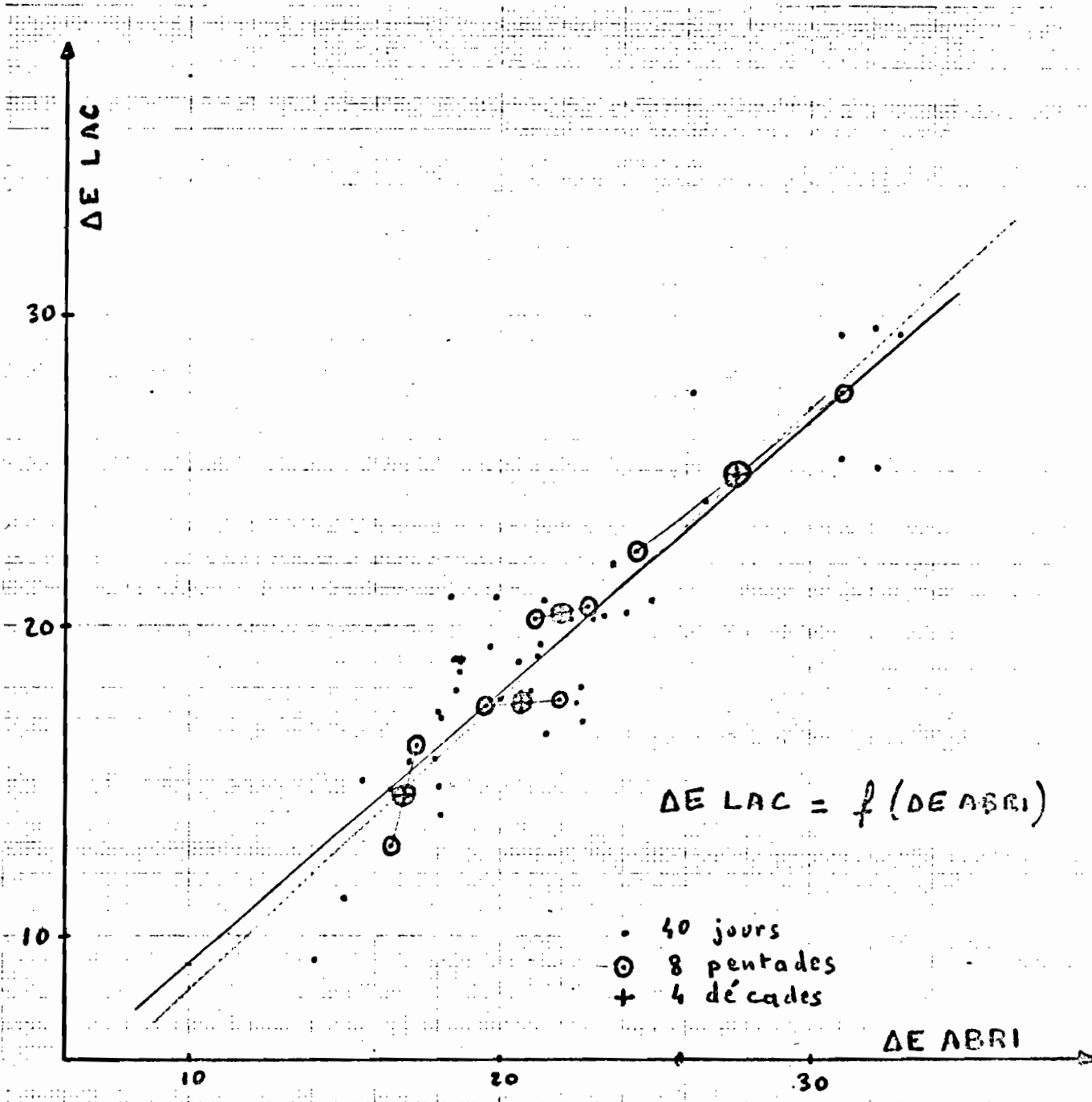
- mai à octobre

$$(h2) \quad TCOL = 0.1410 \cdot TABRI + 25.84 \quad r = 0.8355$$

- octobre à janvier

$$(h3) \quad TCOL = 1.312 \cdot TABRI - 7.897 \quad r = 0.9999$$

Ces corrélations dans l'ensemble très satisfaisantes, à l'exception de celle plus lâche de la période d'hivernage, permettent donc d'estimer TCOL si l'on connaît TABRI, tout au moins dans le cas de conditions climatiques comparables.



III.3.4 - RELATIONS ΔE LAC - ΔE ABRI.

ΔE ABRI peut être établi à partir de E2 ABRI et TCOL.

ΔE LAC sera calculé à partir de E2 EVAP et de TEVAP, eux-mêmes obtenus à partir de E2 ABRI et TCOL par les relations précédentes.

Mais nous avons également établi une corrélation directe entre ΔE LAC et ΔE ABRI, basée sur les 4 décades d'observations communes, sous la forme de 8 couples de moyennes pentadaires.

ELAC	27.5	22.4	20.6	20.2	17.6	17.4	16.1	12.9
E ABRI	31.0	24.3	18.8	21.1	21.9	19.5	17.3	16.5
	1.5/5/74	6.10.5/74	1.5/11/75	6.10/11/75	1.5/12/75	6.10/12/75	27.31/12/75	1.5/1/76

La droite de régression, assez satisfaisante s'écrit :

$$(i) \quad \Delta E \text{ LAC} = 0.9340 \cdot \Delta E \text{ ABRI} - 1.023 \quad r = 0.9641$$

III.4 - METHODOLOGIE DU CALCUL.

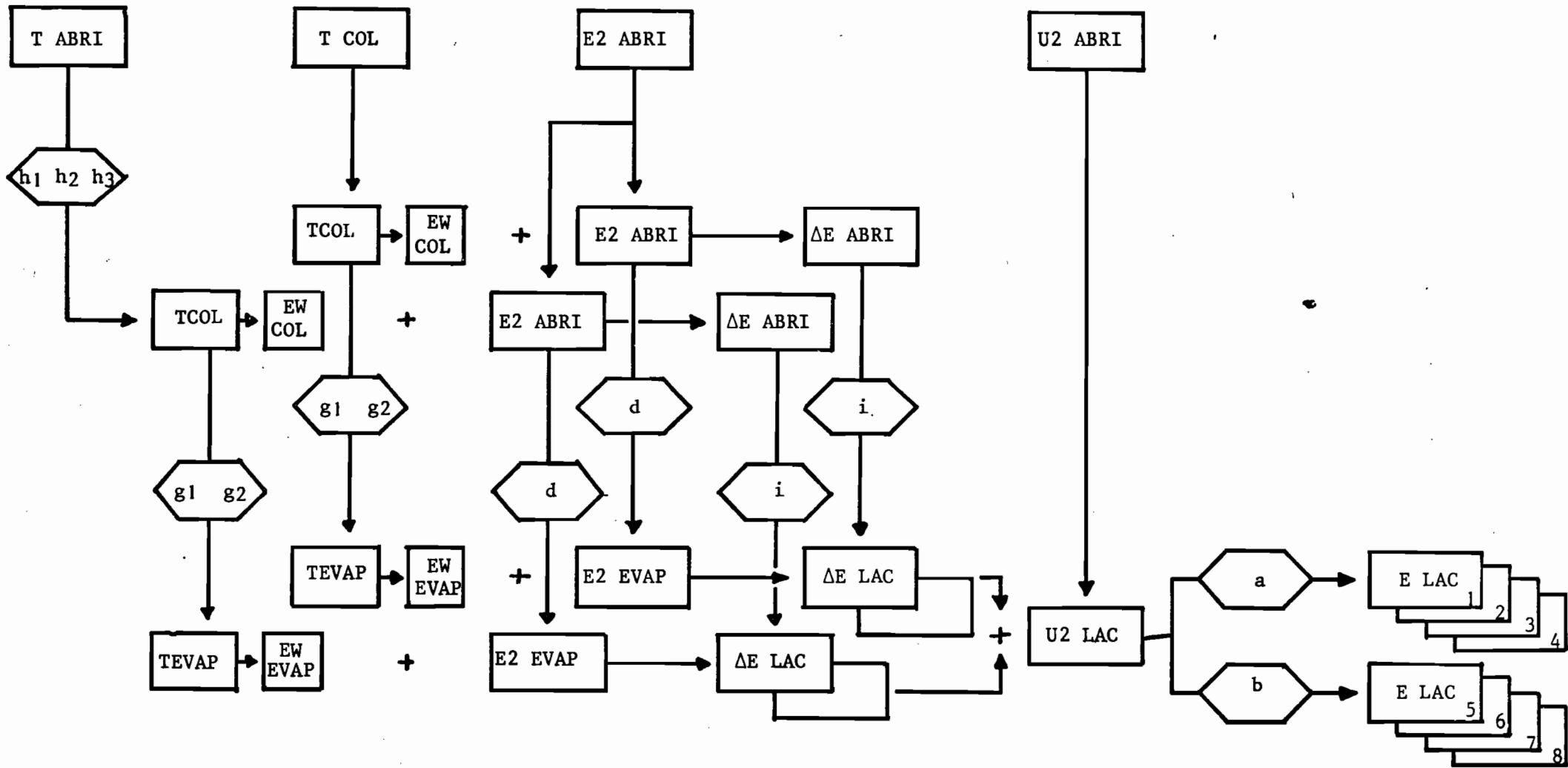
Selon les données de référence disponibles, plusieurs cheminements permettront d'aboutir à l'évaluation de l'évaporation du lac.

Les données initiales nécessaires sont en tout ou partie les valeurs suivantes moyennes sur la période considérée (jour, décade, mois) :

TABRI : température moyenne de l'air °C
 E2 ABRI : tension de vapeur de l'air moyenne sur la période mm Hg
 TCOL : température superficielle moyenne de l'eau d'un bac Colorado °C
 U2 ABRI : vitesse moyenne du vent m/s.

Nous avons rassemblé dans un tableau les cheminements possibles, avec rappel des formules à utiliser.

Selon la période de l'année considérée, il pourra être nécessaire d'utiliser des formules différentes complémentaires.



E LAC par (a) . E LAC par (b)

T CAL mesurée directe	ΔE par (i)	1	5
	ΔE par (g) et(d)	2	6
T CAL par (h) avec T ABRI	ΔE par (i)	3	7
	ΔE par (g) et(d)	4	8

IV - APPLICATION DE LA METHODE AUX 4 ANNEES D'OBSERVATIONS
DE LA STATION SAINT PAUL.

Nous avons écrit un programme sur Ti 59, calculant 8 valeurs de ELAC selon les 8 processus décrits précédemment. Ce programme est utilisé à partir des données mensuelles de TABRI, TCOL, E2 ABRI, U2 ABRI des années 1973, 1974, 1975 et 1976.

IV.1 - VALEURS MOYENNES INTERANNUELLES MENSUELLES.

Nous avons également reconstitué des valeurs moyennes interannuelles des données mensuelles TABRI, TCOL, E2 ABRI, U2 ABRI auxquelles nous avons appliqué le programme en question avec les résultats suivants :

	TABRI	E2 ABRI	TCOL	U2 ABRI	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Janv.	22.3	7.3	21.4	1.45	5.53	5.53	5.48	5.48	5.59	5.59	5.54	5.54
Fév.	25.6	8.0	23.6	1.41	6.39	6.34	6.41	6.35	6.46	6.40	6.48	6.42
Mars	29.7	10.4	26.1	1.54	7.17	7.10	7.44	7.34	7.24	7.17	7.51	7.41
Avril	32.5	14.2	28.8	1.69	7.89	7.82	7.70	7.66	7.95	7.88	7.76	7.72
Mai	32.4	20.6	30.4	2.19	7.43	6.91	7.44	6.92	7.42	6.91	7.43	6.92
Juin	30.7	23.0	30.2	2.39	6.61	6.22	6.58	6.20	6.57	6.19	6.64	6.16
Juil.	27.6	25.1	29.4	1.91	5.06	4.78	5.31	5.04	5.18	4.80	5.33	5.07
Août	26.8	26.3	29.6	1.56	4.68	4.49	4.69	4.50	4.71	4.52	4.73	4.53
Sept.	27.3	26.2	30.0	1.36	4.91	4.74	4.69	4.50	4.95	4.78	4.72	4.53
Oct.	28.8	21.4	29.9	1.08	6.10	6.34	6.09	6.33	6.14	6.38	6.13	6.37
Nov.	25.7	11.7	25.8	1.15	6.35	6.38	6.36	6.39	6.40	6.43	6.41	6.44
Déc.	23.2	8.7	22.5	1.21	5.52	5.55	5.54	5.57	5.56	5.60	5.58	5.62
Moyenne annuelle mm/jour					6.14	6.02	6.14	6.02	6.17	6.05	6.18	6.06
Total annuel mm					2240	2196	2243	2199	2252	2208	2256	2212

On peut voir que selon les cheminements, les résultats demeurent malgré tout très proches. Les plus grosses différences s'observent selon que l'on transforme directement ΔE ABRI en ΔE LAC ou que l'on procède à la transformation successive de TCOL en TEVAP et E2 ABRI en E2 EVAP pour obtenir ΔE LAC.

IV.2 - VALEURS MOYENNES MENSUELLES 1973-1974-1975-1976.

Les résultats obtenus pour les 4 années 1973, 1974, 1975, 1976, sont rassemblés dans les tableaux suivants. Les valeurs mesurées directement figurent dans la première colonne, pour les mois où cette mesure était significative.

Un certain nombre de points anormaux apparaissent :

- Les mois d'hivernage, il est très difficile de mesurer directement l'évaporation par suite d'une trop mauvaise connaissance des apports des affluents au lac, et également du ruissellement direct en nappe dans le lac, depuis ses abords immédiats. A cette période, les infiltrations, ou pour le moins les pertes par humectation des sols nouvellement submergés sont importantes et difficilement chiffrables.
- Dans le cas d'hivernages particulièrement importants, caractérisés par de grosses montées des eaux, allant parfois même jusqu'au déversement (1974 et 1975), il est certain que les infiltrations en hautes eaux ne sont plus négligeables, et se poursuivent en novembre et décembre, voire même en janvier.
- Plus particulier est le cas du mois de mars 1974, où un décollage intempestif d'un élément d'échelle a entraîné une sous-estimation très nette de l'évaporation, et le cas de mai 1976, où le fonctionnement du psychromètre de la station Saint Paul paraît avoir été défectueux, ainsi que le prouve une comparaison avec les résultats obtenus à celle de Kongoussi.

Si l'on écarte tous ces cas litigieux et ne conserve que les 26 valeurs mensuelles restantes (voir tableau), la corrélation entre les valeurs mesurées et les 8 valeurs calculées par le programme est très intéressante. Les résultats ont été regroupés ci-après.

Corrélation EVAP calculée = f (EVAP mesurée)

Processus de calcul	1	2	3	4	5	6	7	8
Abscisse à l'origine	0.232	0.355	0.568	0.166	0.276	0.428	0.045	0.214
Pente	0.967	0.929	0.926	0.961	0.966	0.923	1.011	0.962
Coefficient de corrélation	0.886	0.884	0.860	0.877	0.888	0.884	0.874	0.872
Classement	2	3	8	6	1	3	5	7

La numérotation 1 à 8 correspond à celle du tableau précédent.

1973

	T ST PAUL	E2 ST PAUL	T SUP COL	U ST PAUL	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
JANV	23.1	7.6	21.9	1.43	5.67	5.67	5.65	5.65	5.73	5.73	5.71	5.71
FEV.	26.5	8.0	24.0	1.47	6.64	6.57	6.79	6.70	6.71	6.64	6.86	6.77
MARS	30.5	8.7	25.7	1.64	7.51	7.37	8.40	8.15	7.58	7.44	8.46	8.21
AVRIL	32.6	15.3	28.7	1.72	7.50	7.50	7.43	7.45	7.56	7.56	7.49	7.51
MAI	33.1	21.2	30.8	2.17	7.55	7.09	7.31	6.83	7.54	7.09	7.30	6.84
JUIN	31.3	24.0	30.5	2.36	6.51	6.20	6.30	5.99	6.47	6.17	6.3	5.96
JUIL.	29.0	25.4	30.2	2.12	5.68	5.46	5.46	5.23	5.69	5.46	5.47	5.23
AOUT	27.4	26.4	29.9	1.51	4.85	4.68	4.70	4.52	4.89	4.72	4.74	4.56
SEPT.	27.8	26.2	29.8	1.46	4.81	4.63	4.78	4.60	4.85	4.66	4.82	4.63
OCT.	29.5	17.5	29.8	1.12	7.19	7.22	7.92	7.84	7.24	7.26	7.96	7.88
NOV.	25.9	9.1	25.1	1.36	6.85	6.77	7.42	7.28	6.92	6.85	7.49	7.35
DEC.	23.2	7.6	22.4	1.09	5.72	5.70	5.79	5.76	5.76	5.73	5.83	5.80
Moyenne annuelle mm/jour					6.37	6.23	6.50	6.33	6.41	6.28	6.54	6.37
Total annuel mm					2326	2277	2371	2312	2340	2292	2387	2325

1974

	T ST PAUL	E2 ST PAUL	T SUP COL	U ST PAUL	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
JANV	22.2	6.6	21.3	1.43	5.69	5.65	5.65	5.61	5.75	5.71	5.71	5.67
FEV.	25.2	5.8	23.0	1.57	6.85	6.69	7.03	6.85	6.92	6.76	7.10	6.92
MARS	30.1	9.7	26.5	1.54	7.62	7.49	7.83	7.67	7.70	7.56	7.90	7.74
AVRIL	32.3	13.2	29.0	1.55	8.23	8.08	7.80	7.72	8.29	8.15	7.88	7.79
MAI	33.2	17.5	30.3	2.17	8.34	7.62	8.52	7.81	8.32	7.61	8.49	7.80
JUIN	31.6	22.3	30.8	2.50	7.40	7.01	6.98	6.55	7.33	6.94	6.92	6.50
JUIL.	27.0	24.9	28.8	1.92	4.68	4.36	5.31	5.03	4.70	4.37	5.34	5.05
AOUT	26.6	26.5	29.3	1.61	4.42	4.23	4.63	4.45	4.45	4.25	4.66	4.48
SEPT.	27.2	26.1	30.0	1.38	4.95	4.77	4.72	4.52	5.00	4.81	4.75	4.55
OCT.	29.0	21.9	30.2	1.11	6.19	6.42	6.15	6.39	6.23	6.46	6.20	6.43
NOV.	24.9	13.0	25.2	1.13	5.62	5.76	5.38	5.55	5.66	5.80	5.42	5.59
DEC.	22.3	9.7	11.5	1.31	4.80	4.93	4.73	4.87	4.83	4.97	4.77	4.91
Moyenne annuelle mm/jour					6.23	6.08	6.23	6.08	6.26	6.12	6.26	6.12
Total annuel mm					2275	2221	2273	2221	2285	2234	2285	2234

1975

	T ST PAUL	E2 ST PAUL	T SUP COL	U ST PAUL	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
JANV	21.3	6.7	20.3	1.50	5.24	5.24	5.36	5.35	5.29	5.29	5.42	5.40
FEV.	24.7	7.9	23.2	1.19	6.08	6.04	5.98	5.95	6.14	6.10	6.03	6.00
MARS	29.6	10.9	26.8	1.43	7.37	7.28	7.17	7.11	7.44	7.36	7.24	7.18
AVRIL	33.2	14.2	29.5	1.81	8.49	8.35	8.15	8.05	8.53	8.39	8.19	8.10
MAI	32.0	21.5	30.6	2.23	7.33	6.88	7.12	6.66	7.31	6.87	7.11	6.65
JUIN	31.0	22.9	30.2	2.33	6.60	6.22	6.61	6.24	6.58	6.19	6.59	6.20
JUIL.	27.0	25.3	29.2	1.69	4.75	4.48	5.08	4.83	4.78	4.50	5.12	4.86
AOUT	26.7	27.0	29.8	1.57	4.62	4.48	4.47	4.33	4.65	4.51	4.50	4.35
SEPT.	26.9	27.3	30.2	1.24	4.68	4.58	4.27	4.15	4.71	4.61	4.29	4.16
OCT.	28.9	22.0	30.0	1.02	5.96	6.22	5.98	6.23	5.99	6.25	6.00	6.26
NOV.	25.4	12.9 K	25.9	0.95	5.94	6.03	5.67	5.79	5.94	6.03	5.68	5.80
DEC.	23.3	9.6	23.1	1.24	5.56	5.62	5.35	5.43	5.61	5.67	5.40	5.48
Moyenne annuelle mm/jour					6.05	5.95	5.93	5.84	6.08	5.98	5.96	5.87
Total annuel mm					2209	2172	2166	2133	2219	2183	2178	2142

1976

	T ST PAUL	E2 ST PAUL	T SUP COL	U ST PAUL	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
JANV	22.6	8.5	22.0	1.33	5.40	5.44	5.16	5.22	5.45	5.49	5.21	5.27
FEV.	26.0	10.4	24.1	1.37	5.92	5.97	5.82	5.88	5.98	6.04	5.88	5.95
MARS	28.5	12.3	25.6	1.55	6.29	6.37	6.35	6.42	6.36	6.44	6.42	6.49
AVRIL	32.0	14.1	28.1	1.75	7.47	7.46	7.53	7.51	7.53	7.52	7.58	7.57
MAI	31.4	22.2	30.0	(1.92)	6.43	6.01	6.64	6.23	6.47	6.04	6.68	6.27
JUIN	29.0	22.9	29.5	(2.39)	6.07	5.65	6.42	6.01	6.04	5.62	6.38	5.98
JUIL.	27.6	24.9	29.3	(1.91)	5.05	4.74	5.37	5.10	5.07	4.77	5.40	5.12
AOUT	26.7	25.4	29.5	(1.56)	4.88	4.63	4.96	4.71	4.92	4.67	5.00	4.75
SEPT.	27.4	25.3	30.0	(1.36)	5.18	4.96	4.97	4.73	5.23	5.00	5.01	4.76
OCT.	27.8	24.2	29.5	(1.08)	5.01	5.44	4.39	4.91	5.03	5.47	4.39	4.93
NOV.	26.8	11.9	27.0	(1.15)	7.00	6.96	7.16	7.10	7.05	7.01	7.22	7.15
DEC.	23.9	8.1	23.1	(1.58)	6.20	6.18	6.39	6.35	6.27	6.24	6.46	6.41
Moyenne annuelle mm/jour					5.82	5.85	5.93	5.91	5.95	5.86	5.97	5.89
Total annuel mm					2123	2134	2164	2157	2172	2139	2179	2150

ANNEE	VALEUR MESUREE	EVAPORATION MOYENNE MENSUELLE							
		VALEURS				CALCULEES			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1973	6.3	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
	6.3	6.6	6.6	6.8	6.7	6.7	6.6	6.9	6.8
	7.0	7.5	7.4	8.4	8.1	7.6	7.4	8.5	8.2
	7.0	7.5	7.5	7.4	7.5	7.6	7.6	7.5	7.5
	(8.1)	7.6	7.1	7.3	6.8	7.5	7.1	7.3	6.8
	(7.3)	6.5	6.2	6.3	6.0	6.5	6.2	6.3	6.0
	(7.4)	5.7	5.5	5.5	5.2	5.7	5.5	5.5	5.2
	(7.1)	4.8	4.7	4.7	4.5	4.9	4.7	4.7	4.6
	(6.7)	4.8	4.6	4.8	4.6	4.8	4.7	4.8	4.6
	7.6	7.2	7.2	7.9	7.8	7.2	7.3	8.0	7.9
	7.8	6.8	6.8	7.4	7.3	6.9	6.8	7.5	7.3
5.4	5.7	5.7	5.8	5.8	5.8	5.7	5.8	5.8	
1974	6.4	5.7	5.6	5.6	5.6	5.7	5.7	5.7	5.7
	6.7	6.8	6.7	7.0	6.8	6.9	6.8	7.1	6.9
	(6.3)	7.6	7.5	7.8	7.7	7.7	7.6	7.9	7.7
	8.0	8.2	8.1	7.8	7.7	8.3	8.1	7.9	7.8
	8.1	8.3	7.6	8.5	7.8	8.3	7.6	8.5	7.8
	7.0	7.4	7.0	7.0	6.6	7.3	6.9	6.9	6.5
	(6.4)	4.7	4.4	5.3	5.0	4.7	4.4	5.3	5.1
	(-)	4.4	4.2	4.6	4.4	4.4	4.2	4.7	4.5
	(-)	4.9	4.8	4.7	4.5	5.0	4.8	4.7	4.6
	(7.0)	6.2	6.4	6.2	6.4	6.2	6.5	6.2	6.4
	(7.2)	5.6	5.8	5.4	5.6	5.7	5.8	5.4	5.6
(5.9)	4.8	4.9	4.7	4.9	4.8	5.0	4.8	4.9	
1975	6.0	5.2	5.2	5.4	5.3	5.3	5.3	5.4	5.4
	6.3	6.1	6.0	6.0	5.9	6.1	6.1	6.0	6.0
	7.0	7.4	7.3	7.2	7.1	7.4	7.4	7.2	7.2
	8.3	8.5	8.3	8.1	8.0	8.5	8.4	8.2	8.1
	6.6	7.3	6.9	7.1	6.7	7.3	6.9	7.1	6.6
	6.8	6.6	6.2	6.6	6.2	6.6	6.2	6.6	6.2
	(6.6)	4.7	4.5	5.1	4.8	4.8	4.5	5.1	4.9
	(6.4)	4.6	4.5	4.5	4.3	4.6	4.5	4.5	4.3
	(7.5)	4.7	4.6	4.3	4.1	4.7	4.6	4.3	4.2
	(6.5)	6.0	6.2	6.0	6.2	6.0	6.2	6.0	6.3
	(6.2)	5.9	6.0	5.7	5.8	5.9	6.0	5.7	5.8
(5.9)	5.6	5.6	5.3	5.4	5.6	5.7	5.4	5.5	
1976	5.7	5.4	5.4	5.2	5.2	5.4	5.5	5.2	5.3
	6.4	5.9	6.0	5.8	5.9	6.0	6.0	5.9	5.9
	8.1	(6.3)	(6.4)	(6.4)	(6.4)	(6.4)	(6.4)	(6.4)	(6.5)
	7.3	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.6	7.6
	6.8	6.4	6.0	6.6	6.2	6.5	6.0	6.7	6.3
	(8.0)	6.1	5.6	6.4	6.0	6.0	5.6	6.4	6.0
	(6.8)	5.1	4.7	5.4	5.1	5.1	4.8	5.4	5.1
	4.5	4.9	4.6	5.0	4.7	4.9	4.7	5.0	4.7
	5.0	5.2	5.0	5.0	4.7	5.2	5.0	5.0	4.8
	(6.3)	5.0	5.4	4.4	4.9	5.0	5.5	4.4	4.9
	6.5	7.0	7.0	7.2	7.1	7.0	7.0	7.2	7.2
5.8	6.2	6.2	6.4	6.3	6.3	6.2	6.5	6.4	

- Les valeurs mesurées entre () ne sont pas représentatives.

- Les valeurs calculées entre () sont douteuses.

La corrélation puissance (b) paraît donc légèrement plus satisfaisante que la corrélation linéaire (a). De même la corrélation directe entre ΔE ABRI et ΔE LAC (i) paraît un peu plus satisfaisante que celle passant par TEVAP et E2 EVAP (g1), (g2) et (d).

Les processus n'utilisant pas TCOL sont moins bons, mais pas de façon trop importante, et cette méthode conserve son intérêt en cas d'absence de bac de type Colorado enterré.

Ces résultats semblent prouver l'intérêt de ce faisceau de processus de calcul de l'évaporation mensuelle. Il est certain que les mêmes calculs auraient pu être menés sur des valeurs décennales ou journalières, avec un succès comparable. Cela a été testé sur de courtes périodes, ainsi que nous allons le présenter maintenant.

IV.3 - VALEURS MOYENNES JOURNALIERES ET HORAIRES CALCULEES D'APRES LES MESURES A L'EVAPOTRON.

Nous avons repris les deux formules initiales (a) et (b) que nous avons appliquées aux valeurs moyennes horaires de ΔE et U_2 pour 6 journées caractéristiques (1 - 2/11/75 ; 1 - 2/1/76 ; 2 - 3/5/74) appartenant donc aux décades entièrement dépouillées.

Les résultats sont rassemblés dans 6 tableaux journaliers où l'on retrouve :

ΔE : en mm Hg - déficit de saturation moyen horaire à l'évapotron

U_2 : en m/s - vitesse moyenne horaire du vent

ELAC: 1^e colonne - en mm - évaporation horaire, calculée par (a)

2^e colonne - en mm - évaporation horaire, calculée par (b)

3^e colonne - en Joules - équivalent énergétique de l'évaporation

horaire par (a), pondéré de sorte que la somme journalière de ces évaporations horaires égale celle obtenue par (a) à partir de valeurs moyennes journalières de ΔE et U_2

Q : en Joules/cm² - rayonnement net horaire par cm²

β : rapport de Bowen

R_G : en Joules/cm² - rayonnement global horaire par cm²

R_d : en Joules/cm² - rayonnement diffus horaire par cm²

R_R : en Joules/cm² - rayonnement réfléchi horaire par cm²

L_{\uparrow} : en Joules/cm² - rayonnement horaire de grande longueur d'onde émis par l'eau à la température T_{SURF}

L_{\downarrow} : 1^e colonne - en Joules/cm² - rayonnement horaire atmosphérique par cm², obtenu par un bilan du rayonnement

2^e colonne - en Joules/cm² - rayonnement horaire atmosphérique par cm², obtenu à partir de la formule de BRUNT

S : en Joules/cm² - énergie sortant du système (par transmission de chaleur à l'eau du lac, ou par advection).

Nous rappelons ici quelques formules classiques du bilan énergétique :

$$(j) \quad Q = R_G - R_R + L\downarrow - L\uparrow$$

$$(k) \quad L\uparrow = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{SURF}^4$$

ϵ : émissivité de l'eau = 0.96

σ : constante de PLANCK = $5.7 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

$$(l) \quad ELAC = \frac{Q - S}{1 + \beta}$$

L : chaleur latente de vaporisation = 2430 J/cm³

$$(m) \quad L\downarrow = \sigma \cdot T_{AIR}^4 \cdot (0,60 + 0,05 \cdot \sqrt{E2 \text{ EVAP}})$$

qui est une formule de BRUNT, avec les coefficients recommandés par C. RIOU, dans laquelle :

T AIR est la température de l'air mesurée à l'évapotron à 2 m.

Nous avons également fait figurer sur ces tableaux les valeurs moyennes journalières, ou les totaux, ainsi que les valeurs de l'évaporation journalière et de son équivalent énergétique calculés par (a) et (b). Enfin, afin de mieux définir le type radiatif de la journée, figure également le rapport R_d / R_G .

Les résultats sont intéressants et appellent deux sortes de remarques :

- Concernant le flux S

- Le système constitué par le lac et l'air environnant est systématiquement déficitaire en énergie. Il faut donc que le milieu extérieur lui cède de l'énergie ; celle-ci provient pour une part de l'eau du lac et avant du sol, tout se passant comme si le lac froid était rechauffé par le sol le contenant plus chaud (ce qui est vérifié puisque les températures de sols à 1 m à St PAUL sont systématiquement plus élevées que l'eau du lac de plusieurs degrés à toutes périodes de l'année). Mais cela provient pour une autre part, certainement déterminante, des échanges d'énergie latéraux par advection, l'air chaud continental venant remplacer, poussé par le vent, l'air froid et humide surplombant le lac. Ce qui est donc une très bonne illustration de l'effet d'oasis, malgré les dimensions, déjà importantes du lac.

- Concernant le rayonnement atmosphérique $L\downarrow$

- Il est certain que les deux valeurs obtenues pour $L\downarrow$ diffèrent sensiblement tout en conservant le même ordre de grandeur journalier. A l'échelle horaire les disparités s'accroissent encore.

La valeur calculée par la formule de BRUNT ne tient pas compte de la nébulosité que nous connaissons mal. Il est certain aussi qu'elle n'intègre pas les variations dues à la plus ou moins grande part de rayonnement diffus dans le rayonnement global.

La valeur obtenue par bilan énergétique est bien sûr entachée des erreurs habituelles de ce genre de calcul, où s'ajoutent les erreurs de chacun des termes du bilan.

1.11.1975

	Δe mm Hg	U2 m/s	ELAC (a) mm	ELAC (b) mm	ELAC (a) joules Homog.	Q joules	$1+\beta$	R_G J	R_d J	R_R J	L↑ J	L↓ J bilan	L↓ J BRUNT	S J
0														
1	22.8	0.08	0.28	0.22	67	-41	1.09	0	0	0	-160	119	124	-114
2	22.7	0.06	0.28	0.21	67	-41	1.08	0	0	0	-160	119	124	-113
3	19.8	0.11	0.25	0.20	60	-41	1.16	0	0	0	-159	118	124	-111
4	20.1	0.31	0.26	0.23	62	-41	1.18	0	0	0	-159	118	122	-114
5	20.1	0.25	0.25	0.23	60	-41	1.23	0	0	0	-159	118	119	-115
6	19.3	0.22	0.24	0.21	58	-41	1.25	0	0	0	-159	118	119	-113
7	20.4	0.03	0.25	0.17	60	-36	1.22	10	8	-4	-159	117	118	-109
8	20.4	0.17	0.26	0.22	62	+2	1.18	79	44	-14	-159	96	121	-71
9	18.4	0.50	0.24	0.23	58	82	1.12	171	73	-18	-159	88	128	+17
10	22.2	2.00	0.33	0.33	79	166	1.02	247	105	-21	-161	101	131	+85
11	25.7	2.75	0.41	0.40	98	240	0.94	305	122	-24	-162	121	135	+148
12	25.6	3.44	0.43	0.41	103	276	0.90	333	127	-21	-161	125	136	+183
13	25.5	3.28	0.42	0.40	101	289	0.89	339	121	-23	-161	134	137	+199
14	25.5	3.11	0.42	0.40	101	264	0.88	308	116	-23	-162	141	239	+175
15	26.3	3.00	0.43	0.41	103	209	0.87	245	111	-21	-162	147	139	+119
16	26.5	2.67	0.42	0.41	101	139	0.86	169	94	-19	-162	151	139	+52
17	26.0	1.78	0.38	0.38	91	52	0.87	83	59	-13	-161	143	139	-27
18	23.4	0.61	0.31	0.30	74	-21	0.94	16	15	-4	-161	128	135	-91
19	21.1	0.56	0.28	0.27	67	-36	1.01	0	0	0	-160	124	131	-104
20	21.8	0.61	0.29	0.28	70	-36	1.02	0	0	0	-159	123	128	-107
21	21.4	0.50	0.28	0.26	67	-38	1.06	0	0	0	-158	120	125	-109
22	18.5	0.17	0.23	0.20	55	-39	1.10	0	0	0	-158	119	126	-99
23	16.4	0.14	0.21	0.17	50	-39	1.15	0	0	0	-158	119	127	-96
24	18.2	0.22	0.23	0.20	55	-39	1.15	0	0	0	-158	119	124	-102
	22.0	1.11	7.36	6.75	1769	1189	1.05	2305	995	-205	-3837	2926	3090	-617

$$R_d/R_G = 43 \%$$

a) 7.27 mm - 1766 J

b) 7.29 mm - 1771 J

	Δe mm Hg	U2 m/s	ELAC (a) mm	ELAC (b) mm	ELAC (a) joules Homog.	Q joules	$1+\beta$	R_G J	R_d J	R_R J	L \uparrow J	L \downarrow J bilan	L \downarrow J BRUNT	S J
0														
1	18.1	0.25	0.23	0.21	55	-40	1.18	0	0	0	-158	118	123	-105
2	16.8	0.25	0.22	0.19	52	-41	1.27	0	0	0	-158	117	122	-107
3	16.7	0.31	0.22	0.20	52	-41	1.27	0	0	0	-158	117	121	-107
4	16.8	0.22	0.21	0.19	50	-42	1.29	0	0	0	-158	116	120	-106
5	15.1	0.17	0.19	0.16	45	-43	1.32	0	0	0	-158	115	119	-102
6	19.0	0.47	0.25	0.24	60	-44	1.31	0	0	0	-158	114	115	-123
7	19.9	0.14	0.25	0.21	60	-38	1.26	32	14	-6	-158	94	116	-114
8	20.6	0.14	0.26	0.21	62	+16	1.14	115	39	-17	-159	77	121	-55
9	22.1	1.39	0.31	0.31	74	+117	1.01	205	65	-17	-159	88	128	+42
10	24.8	3.00	0.40	0.39	96	+205	0.95	279	83	-21	-160	107	130	+114
11	25.1	3.39	0.42	0.40	100	+266	0.90	330	83	-21	-161	118	135	+176
12	25.6	2.86	0.41	0.40	98	+299	0.88	354	77	-21	-161	127	137	+213
13	26.2	2.28	0.40	0.39	96	+295	0.88	342	80	-24	-162	139	139	+211
14	27.1	2.47	0.42	0.41	100	+268	0.89	315	70	-25	-163	141	139	+179
15	26.9	2.17	0.41	0.40	98	+216	0.88	255	66	-23	-163	147	141	+130
16	26.4	1.92	0.39	0.39	93	+114	0.87	180	56	-21	-163	148	141	+63
17	25.3	1.58	0.36	0.36	86	+59	0.87	90	41	-15	-162	146	141	+16
18	21.5	0.56	0.28	0.27	67	-21	0.92	16	10	-3	-161	127	139	-83
19	17.2	0.42	0.22	0.21	52	-36	1.01	0	0	0	-161	125	137	-89
20	16.9	0.31	0.22	0.20	52	-36	1.06	0	0	0	-161	125	135	-91
21	17.7	0.08	0.22	0.17	53	-36	1.08	0	0	0	-161	125	133	-93
22	18.8	0.11	0.23	0.18	55	-36	1.10	0	0	0	-161	125	131	-97
23	18.4	0.06	0.23	0.17	55	-36	1.11	0	0	0	-160	124	130	-97
24	19.1	0.11	0.24	0.19	57	-36	1.12	0	0	0	-160	124	129	-100
	20.9	1.03	6.98	6.47	1670	1359	1.07	2513	684	-214	-3844	2904	3122	-325

$$R_d/R_G = 27 \%$$

a) 5.87 mm - 1669 J

b) 6.88 mm - 1671 J

1.01.1976

	Δe mm Hg	U2 m/s	ELAC (a) mm	ELAC (b) mm	ELAC (a) joules Homog.	Q joules	$1+\beta$	R_G J	R_d J	R_R J	L^+ J	L^+ J bilan	L^+ J BRUNT	S J
0	19.5	0.08	0.24	0.19	58	- 31	1.09	0	0	0	-151	120	113	- 94
1	18.8	0.17	0.24	0.20	57	- 32	1.09	0	0	0	-150	118	112	- 94
2	17.4	0.39	0.23	0.21	54	- 33	1.10	0	0	0	-150	117	113	- 92
3	16.8	0.36	0.22	0.20	52	- 33	1.07	0	0	0	-149	116	114	- 89
4	16.7	0.53	0.22	0.21	53	- 33	1.11	0	0	0	-149	116	112	- 92
5	16.8	0.58	0.22	0.22	53	- 33	1.10	0	0	0	-148	115	111	- 91
6	16.4	0.28	0.21	0.19	51	- 25	1.10	7	6	- 4	-148	120	112	- 81
7	15.3	0.33	0.20	0.18	48	+ 10	1.12	47	38	- 7	-149	119	114	- 44
8	15.6	1.17	0.22	0.22	53	+ 66	1.09	110	79	-10	-149	115	115	+ 8
9	17.5	3.81	0.31	0.29	74	+133	0.97	171	117	-10	-149	121	118	+ 61
10	17.9	3.31	0.30	0.29	73	+183	0.92	216	141	-10	-150	127	120	+116
11	17.8	2.67	0.29	0.28	68	+213	0.87	242	152	-12	-150	133	123	+154
12	18.2	2.69	0.29	0.29	70	+216	0.84	237	150	-11	-151	141	126	+157
13	18.7	1.78	0.28	0.28	66	+190	0.82	207	140	- 9	-152	144	128	+136
14	18.1	1.75	0.27	0.27	64	+135	0.79	158	113	- 9	-151	137	129	+ 84
15	17.6	1.25	0.25	0.25	59	+ 72	0.78	87	70	- 9	-151	145	129	+ 26
16	16.5	0.81	0.22	0.22	54	+ 10	0.80	29	27	- 5	-151	137	129	- 33
17	11.8	0.42	0.16	0.15	39	- 21	0.90	3	3	- 2	-151	129	128	- 56
18	10.3	0.44	0.14	0.13	34	- 27	0.99	0	0	0	-150	123	126	- 61
19	9.5	0.47	0.13	0.12	32	- 29	1.04	0	0	0	-150	121	126	- 62
20	10.9	0.33	0.15	0.13	36	- 30	1.08	0	0	0	-151	121	124	- 69
21	12.0	0.08	0.16	0.12	38	- 30	1.09	0	0	0	-151	121	122	- 71
22	13.0	0.22	0.17	0.15	41	- 30	1.09	0	0	0	-150	121	120	- 75
23	12.3	0.17	0.16	0.14	39	- 30	1.16	0	0	0	-150	121	118	- 75
24														
	15.6	1.00	5.27	4.94	1266	811	1.00	1514	1036	-98	-3601	2998	2882	-437

$$R_d/R_G = 68 \%$$

a) 5.2 mm 1266 J

b) 5.2 mm 1266 J

	Δe mm Hg	U2 m/s	ELAC (a) mm	ELAC (b) mm	ELAC (a) joules Homog.	Q joules	$1+\beta$	R_G J	R_d J	R_R J	L↑ J	L↓ J bilan	L↓ J BRUNT	S J
0	12.8	0.11	0.17	0.13	39	-30	1.18	0	0	0	-150	120	117	- 76
1	12.4	0.17	0.16	0.14	38	-30	1.19	0	0	0	-150	120	117	- 75
2	14.9	0.08	0.19	0.15	45	-30	1.13	0	0	0	-149	119	115	- 81
3	14.4	0.11	0.18	0.15	44	-30	1.15	0	0	0	-149	119	115	- 81
4	16.1	0.42	0.21	0.20	50	-30	1.12	0	0	0	-149	119	113	- 86
5	15.4	0.39	0.20	0.19	48	-30	1.16	0	0	0	-149	119	113	- 86
6	17.2	0.89	0.24	0.23	56	-27	1.11	6	6	- 3	-149	119	112	- 89
7	16.4	2.19	0.25	0.25	61	7	1.09	43	36	- 4	-149	117	113	- 59
8	16.6	3.33	0.78	0.27	68	66	1.02	106	75	- 8	-149	117	116	- 3
9	18.0	3.25	0.30	0.29	73	136	0.95	176	113	-10	-149	119	117	+ 67
10	18.5	3.28	0.31	0.30	75	190	0.89	224	135	-12	-149	127	120	+123
11	19.0	3.03	0.31	0.30	76	216	0.83	245	145	-14	-150	135	123	+153
12	19.0	2.53	0.30	0.30	72	216	0.81	239	145	-13	-150	140	126	+158
13	17.6	1.44	0.25	0.26	62	192	0.82	211	133	-13	-152	146	129	+141
14	19.3	1.47	0.28	0.28	66	146	0.82	163	114	-11	-153	147	129	+ 92
15	18.8	1.00	0.26	0.26	62	78	0.85	97	79	- 9	-154	144	130	+ 25
16	13.4	0.39	0.18	0.17	42	17	0.84	40	37	- 6	-153	136	133	- 18
17	11.4	0.31	0.15	0.14	36	-15	0.96	6	6	-3	-153	135	131	- 49
18	10.4	0.47	0.14	0.13	34	-25	0.99	0	0	-0	-152	127	129	- 59
19	10.4	0.44	0.14	0.13	34	-23	1.04	0	0	0	-152	129	127	- 58
20	10.7	0.44	0.15	0.14	34	-19	1.08	0	0	0	-152	133	126	- 56
21	10.4	0.42	0.14	0.13	33	-22	1.13	0	0	0	-151	129	124	- 59
22	11.3	0.42	0.15	0.14	35	-28	1.11	0	0	0	-151	125	123	- 68
23	11.9	0.42	0.16	0.15	38	-30	1.10	0	0	0	-150	120	121	- 72
24														
	14.8	1.13	5.12	4.83	1222	+895	1.01	1556	1024	- 106	-3614	3059	2919	-316

$$R_d/R_G = 66 \%$$

a) 5.02 mm - 1222 J

b) 5.04 mm - 1225 J

2.05.1974

	Δe mm Hg	U2 m/s	ELAC (a) mm	ELAC (b) mm	ELAC (a) joules Homo g.	Q joules	$1+\beta$	R_G J	R_d J	R_R J	L↑ J	L↓ J bilan	L↓ J BRUNT	S J
0	19.7	0.2	0.25	0.22	59	(-35)	1.05	0	0	0	-162	127	135	- 97
1	22.2	0.3	0.28	0.26	67	(-35)	1.03	0	0	0	-162	127	133	-104
2	24.3	0.3	0.31	0.28	73	(-35)	1.04	0	0	0	-162	127	129	-111
3	24.7	0.2	0.31	0.27	73	(-35)	1.04	0	0	0	-162	127	129	-111
4	23.1	0.3	0.29	0.27	69	(-35)	1.06	0	0	0	-162	127	129	-108
5	23.0	0.4	0.29	0.28	70	(-27)	1.04	1	1	(0)	-162	134	130	-100
6	23.5	0.4	0.30	0.28	71	26	1.01	24	21	(-10)	-161	173	131	- 46
7	24.1	2.0	0.36	0.36	85	70	0.99	116	46	(-12)	-161	127	131	- 14
8	25.6	4.2	0.46	0.42	109	159	0.92	208	62	(-15)	-161	127	134	+ 59
9	26.6	4.7	0.49	0.44	117	228	0.88	271	78	(-18)	-161	136	136	+125
10	27.9	4.7	0.52	0.46	123	275	0.85	323	80	(-20)	-162	134	138	+170
11	28.9	4.9	0.54	0.48	129	310	0.84	357	79	(-20)	-162	137	139	+202
12	29.5	4.6	0.54	0.49	129	304	0.84	348	80	(-21)	-163	140	140	+196
13	30.4	3.7	0.52	0.48	123	274	0.83	325	83	(-20)	-163	132	140	+172
14	30.9	3.6	0.52	0.49	124	221	0.84	277	84	(-18)	-164	126	141	+117
15	30.2	3.3	0.50	0.47	119	149	0.84	203	89	(-15)	-164	125	142	+ 49
16	28.6	3.0	0.46	0.45	110	73	0.83	124	69	(-12)	-163	124	144	- 18
17	28.6	2.2	0.43	0.43	102	11	0.84	44	28	(-11)	-163	141	142	- 75
18	27.4	1.0	0.37	0.37	88	(-21)	0.88	0	0	0	-163	142	140	- 98
19	19.9	0.3	0.25	0.23	60	(-31)	0.97	0	0	0	-163	132	141	- 89
20	21.5	0.4	0.28	0.26	65	(-31)	0.98	0	0	0	-163	132	138	- 95
21	21.8	0.6	0.28	0.28	68	(-31)	0.98	0	0	0	-163	132	138	- 98
22	18.3	0.3	0.23	0.21	56	(-31)	1.04	0	0	0	-162	132	137	- 89
23	22.4	0.7	0.30	0.29	70	(-31)	1.01	0	0	0	-162	132	134	-102
24														
	25.1	1.9	9.08	8.44	2159	1722	0.942	2620	800	-194	-3896	3193	3271	-265

a) 8.88 mm 2158 J

 $R_d/R_G = 31 \%$

b) 8.88 mm 2157 J

	Δe mm Hg	U2 m/s	ELAC (a) mm	ELAC (b) mm	ELAC (a) joules Homog.	Q joules	$1+\beta$	R_G J	R_d J	R_R J	L↑ J	L↓ J bilan	L↓ J BRUNT	S J
0	24.1	1.2	0.33	0.33	80	(-31)	1.00	0	0	0	-162	131	132	-111
1	26.3	0.4	0.33	0.31	80	(-31)	1.02	0	0	0	-162	131	127	-113
2	27.1	0.2	0.34	0.29	81	(-31)	1.03	0	0	0	-161	130	125	-114
3	27.6	0.4	0.35	0.33	84	(-31)	1.05	0	0	0	-161	130	122	-119
4	26.4	0.1	0.32	0.26	78	(-31)	1.06	0	0	0	-161	130	123	-114
5	26.5	0.2	0.33	0.29	79	(-31)	1.04	0	0	0	-160	130	123	-113
6	26.1	1.3	0.36	0.36	87	24	1.03	58	44	(-10)	-160	136	123	- 66
7	25.5	0.5	0.33	0.31	79	82	1.01	114	77	(-12)	-160	140	126	+ 2
8	28.0	1.0	0.38	0.38	90	149	0.98	173	88	(-15)	-161	152	126	+ 61
9	31.3	1.7	0.45	0.45	108	241	0.96	253	123	(-17)	-162	167	127	+137
10	33.0	1.9	0.48	0.48	116	273	0.96	282	164	(-20)	-164	175	130	+162
11	32.0	2.4	0.49	0.48	117	299	0.92	322	169	(-21)	-164	162	133	+191
12	33.1	2.7	0.52	0.50	125	347	0.91	348	144	(-22)	-165	186	134	+233
13	35.1	2.8	0.55	0.53	133	316	0.91	329	117	(-21)	-166	174	136	+195
14	35.2	2.8	0.56	0.54	133	276	0.91	291	97	(-20)	-167	172	138	+155
15	36.3	1.9	0.53	0.52	127	167	0.91	197	95	(-16)	-168	154	140	+ 51
16	37.9	1.5	0.53	0.53	127	79	0.92	115	77	(-12)	-170	146	140	- 38
17	36.9	1.4	0.51	0.51	123	26	0.92	53	43	(-10)	-169	152	139	- 87
18	30.5	1.0	0.41	0.41	98	(-28)	0.95	2	2	(- 1)	-168	139	142	-121
19	27.3	0.7	0.36	0.35	86	(-31)	0.98	0	0	0	-167	136	142	-115
20	24.2	0.4	0.31	0.29	74	(-31)	1.03	0	0	0	-166	135	139	-107
21	24.6	0.2	0.31	0.27	74	(-31)	1.05	0	0	0	-166	135	136	-109
22	25.2	0.3	0.32	0.29	76	(-31)	1.06	0	0	0	-165	134	134	-112
23	26.1	0.2	0.32	0.28	78	(-31)	1.08	0	0	0	-165	134	131	-115
24														
	29.4	1.13	9.71	9.28	2333	1910	0.987	2537	1240	-197	-3940	3511	3168	-367

a) 9.60 mm 2332 J

$$R_d/R_G = 49 \%$$

b) 9.58 mm 2329 J

V - CONCLUSION.

Cette note sommaire est destinée à faire une première synthèse partielle de l'étude énergétique de l'évaporation du lac de Bam. Les résultats et formules proposés s'appuient sur des dépouillements, certes fragmentaires, mais choisis de façon à être représentatifs des différentes situations climatiques du lac.

A ce titre ils permettent une extrapolation, que nous n'avons pas jugée trop hasardeuse, et une meilleure connaissance du phénomène évaporatoire à diverses échelles de temps, de la journée à l'année.

Nous pensons que ces résultats sont généralisables aux observations météorologiques existant dans des régions de climat comparable. Il convient toutefois de garder présent à l'esprit la forme et l'orientation particulière du lac de Bam qui privilégie certainement l'"effet d'oasis" rencontré.

Cette étude, si les dépouillements étaient plus nombreux, pourrait déboucher sur une meilleure connaissance des échanges énergétiques, à l'échelle horaire, journalière ou annuelle, entre les différents éléments du système soleil - air - lac - sol. Le bilan de grande longueur d'onde mériterait notamment d'être étudié plus en détail.

Le principal intérêt de cette note nous semble être d'avoir mis en évidence que l'évaporation d'un lac sous ce type de climat est beaucoup plus étroitement dépendante des conditions de sécheresse de l'air environnant, que de l'énergie radiative solaire disponible.