

EVAPORATION FROM FREE WATER SURFACES IN THE  
SUDANO-SAHELIAN CLIMATE

Bernard Pouyaud, ORSTOM

Centre ORSTOM, B.P. 5045, 34032 Montpellier, Cedex, France

ABSTRACT

The knowledge on evaporation could be considered a minor element in water resource management in regions where the occurrence or importance of a rainy season can be questioned. However, particularly in the Sudano-Sahelian zone, evaporation is the most important parameter of the hydrological balance.

How can the management of a basin be planned if a parameter is inadequately estimated although it exceeds the precipitation by two to ten times? How can irrigation schemes be calculated if the agricultural water consumption is not sufficiently known where evaporation from a free surface is the first approach? In order to be able to evaluate this evaporation the engineer will depend essentially on data derived from nearby sites.

- Is there a water management plan from which one could draw a hydrological balance?
- Are there climatological reference stations, are they equipped with evaporation pans and if so, which type?
- Are all parameters known in order to apply the PENMAN formula?

Area scales (size of the water body) and time scales (time intervals in which evaporation has been determined) are reliable determinants as well. All formulas are not comparable if area or time scales are not identical. This presentation attempts to offer various methods for use by the engineer and, finally, points out their limitations.

O.R.S.I.O.M. Fonds Documentaire

N° : 39697

Cote : B

169

3 JUN 1994

81369

L'évaporation des nappes d'eau libre en climat soudano-sahélien.

Dr. Pouyaud B., ORSTOM  
Centre ORSTOM-B.P.5045  
34032 MONTPELLIER Cedex  
FRANCE

## INTRODUCTION

La connaissance de l'évaporation des nappes d'eau pourrait paraître un élément mineur des projets d'aménagement dans des régions où l'on s'interroge surtout sur l'occurrence et l'importance de la saison des pluies. Il n'en est rien, car surtout dans les zones soudano-sahéliennes, l'évaporation est le principal terme du bilan hydrologique. Comment planifier la gestion d'une retenue d'eau si l'on estime mal l'amplitude d'un paramètre qui représente 2 à 10 fois la hauteur de précipitation ? Comment dimensionner des périmètres irrigués si n'est pas suffisamment connue la consommation en eau des spéculations agricoles projetées, dont l'évaporation d'une nappe d'eau libre est une première approche ? Encore faut-il pouvoir évaluer cette évaporation ; pour ce faire, la panoplie de l'ingénieur aménagiste dépend essentiellement des données existant sur ou à proximité du site :

- Existe-t-il un plan d'eau aménagé dont on puisse faire le bilan hydrique ?
- Existe-t-il des stations climatologiques de référence ? munies ou non de bacs d'évaporation ? de quel type ?
- Connaît-on tous les paramètres nécessaires pour appliquer la formule de PENMAN ?

Les échelles spatiales (taille de la nappe d'eau) et temporelles (sur quel pas de temps recherche-t-on l'évaporation) sont aussi bien sûr déterminantes : toutes les formules ne sont pas équivalentes selon les échelles de temps et d'espace investiguées. La présente communication s'attachera à présenter les diverses méthodes envisageables à la portée de l'aménagiste, puis dégagera dans une dernière partie leurs limites d'utilisation.

## L'EVAPORATION, RESULTAT DU BILAN HYDROLOGIQUE

Lorsqu'on isole, dans l'environnement naturel, un système d'eau dont il est possible de faire le bilan des entrées et des sorties, il devient possible d'en calculer l'évaporation, terme résiduel de ce bilan, tous les autres étant connus ou estimés.

On exprime en général ce bilan par une équation de la forme :

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

où sur la période pour laquelle est effectué le bilan :

. P et E sont la pluie et l'évaporation, définies comme des hauteurs afférentes à une surface de référence A, (dans une nappe d'eau libre la surface d'évaporation et la surface d'interception sont identiques et égales à la surface de la nappe).

.  $Q_a$  et  $Q_p$  sont les volumes apportés ou perdus par le système dont est fait le bilan.  $Q_a$  intègre les apports fluviaux, les ruissellements périphériques et les éventuels apports du drainage d'une nappe amont, alors que  $Q_p$  regroupe toutes les pertes, déversements vers l'aval, infiltrations et prélèvements de toutes natures.

.  $\Delta S$  enfin représente la variation du stock d'eau contenu par le système (variation du volume de la nappe).

Il est plus facile d'utiliser une relation entre hauteurs d'eau et variations de niveau que l'on écrira :

$$E = P + \Delta HQ_a - \Delta HQ_p - \Delta H_s$$

où  $\Delta HQ_a$  est la variation du plan d'eau, correspondant aux apports  $Q_a$ .

$\Delta HQ_p$ , la variation du plan d'eau due aux pertes  $Q_p$

$\Delta H_s$ , la variation effective du plan d'eau durant la période pour laquelle est faite le bilan.

Il est bien évident que la précision avec laquelle sera connue l'évaporation E est directement fonction de celle avec laquelle est connue chacune des autres composantes. Faire le bilan hydrologique d'un système conduit donc à deux exigences paradoxales :

- une définition précise de l'évaporation exigerait une période d'établissement du bilan assez longue pour minorer l'importance de l'imprécision de chacun des termes.
- mais plus cette période est grande, plus il est difficile de définir et d'estimer certains des paramètres tels que la pluie interceptée par un bac ou le ruissellement direct vers la nappe, qui conduisent classiquement à éliminer ces périodes.

En tout état de cause, il serait déraisonnable d'utiliser la méthode du bilan hydrologique pour des périodes inférieures à 5 à 10 jours, la bonne échelle de temps étant donc la décade ou le mois. Il faut savoir aussi que les périodes de pluies fréquentes permettent rarement de boucler de bons bilans et que cette méthode est surtout applicable aux périodes sèches. Nous donnons ci-après les résultats d'évaporations mensuelles et annuelles moyennes, obtenus par la méthode du bilan hydrique pour quelques nappes d'eau soudano-sahéliennes célèbres, en  $\text{mm.j}^{-1}$  :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ann.
Lac de BAM 1966-76	5,7	6,3	7,0	7,6	7,8	7,4	6,6	5,2	5,2	6,3	6,4	5,5	6,42
Mare d'OURS 1976-83	5,5	5,9	6,4	(7,3)	(9,4)	(9,0)	-	-	(7,0)	6,3	5,5	5,0	-
Lac TCHAD 1965-78	4,4	5,5	6,8	7,6	7,3	6,7	5,7	4,8	5,3	6,4	5,9	4,8	5,95

Ces résultats, somme toute cohérents malgré l'imprécision de l'évaluation de certains termes, constituent une bonne approche de l'évaporation de nappes d'eau libre de diverses superficies pour des zones où la pluviométrie varie de 800 à 400 mm en année moyenne. Ce sont ces résultats, les seuls hydrologiquement irréfutables, qui permettent le calage des autres méthodes.

#### L'ÉVAPORATION A PARTIR DES MESURES SUR BACS ÉVAPORATOIRES

Les mesures de l'évaporation sur bacs évaporatoires sont relativement faciles à conduire et fournissent d'intéressantes approches de l'évaporation des nappes d'eau libre. Plusieurs types de bacs coexistent, qui ont, certains, la faveur des climatologues (le bac classe A), d'autres celles des hydrologues (le bac Colorado enterré). Le bac Colorado peut être entouré de sol nu ou d'un anneau de garde en pelouse irriguée, ce qui a pour conséquence de limiter plus ou moins "l'effet oasis", c'est à dire le facteur d'échelle et l'influence de l'advection. Des études comme celles du lac de BAM ont eu l'avantage de fournir des résultats assez nombreux et précis pour permettre la comparaison de l'évaporation du lac (ELAC) avec celles mesurées sur différents bacs évaporatoires :

ESN : Bac Colorado sol nu  
EPEL : Bac Colorado pelouse  
ECLA : Bac Classe A

Les valeurs du "coefficient de Bac" (moyennes interannuelles),  $C = ELAC/EBAC$  sont particulièrement instructives. Dans l'étude du lac de Bam, nous disposons de trois stations climatologiques dotées de diverses catégories de Bac. La station SAINT PAUL était située à 2 km au Nord-Est du lac, à l'amont donc des vents dominants d'Harmattan, et par conséquent hors de l'influence du lac. La station de BAM est à proximité du lac au Nord-Est également. Enfin, la station de KONGOUSSI, à l'immédiate proximité du lac au Sud-Ouest, est donc sous le vent du lac, et sous l'influence de son microclimat. Les résultats sont très significatifs et traduisent à la fois l'influence de la proximité du lac et des différentes sortes de bac ou d'environnement :

#### \* Station SAINT PAUL (1973-76)

ELAC/ESN = 0,71  
ELAC/EPEL = 0,89  
ELAC/ECLA = 0,68

#### \* Station BAM (1973-76)

ELAC/ESN = 0,82

#### \* Station KONGOUSSI (1973-76)

ELAC/ESN = 0,84

A titre de comparaison pour le lac TCHAD et la station de BOL-MATAFO, située au Nord-Est de BOL à quelques km au Nord-Est du lac, on trouvait de 1965 à 1978  $ELAC/ESN = 0,68$ .

Ces résultats montrent que le rapport  $ELAC/ESN$  passe donc de 0,71 à SAINT PAUL à 0,82 à BAM et 0,84 à KONGOUSSI, mettant bien en évidence l'advection

nettement plus sensible à SAINT PAUL qu'aux stations de BAM et KONGOUSSI, sous l'influence du microclimat du lac.

L'examen des valeurs mensuelles de ce coefficient de Bac montrerait qu'il est très variable d'un mois à l'autre puisque  $ELAC/ESN$  à SAINT PAUL atteint 0,90 en saison des pluies pour descendre à moins de 0,65 en fin de saison sèche.

Les rapports  $ELAC/ECLA$  sont systématiquement inférieurs à ceux de  $ELAC/ESN$  avec une répartition mensuelle comparable. Ce rapport  $ELAC/ECLA$  de 0,68 pour le lac de BAM passe à 0,59 pour le lac TCHAD et à 0,51 pour la mare d'OURSIS, illustrant bien les effets combinés du degré d'aridité et de l'importance relative de la superficie des nappes d'eau évaporante.

Selon donc les dimensions des nappes d'eau et la représentation des stations de référence, on pourra retenir les valeurs moyennes annuelles suivantes de ces rapports :

0,68 à 0,73 pour le bac Colorado Sol nu  
0,50 à 0,68 pour le bac Classe A  
0,90 pour le bac Colorado pelouse.

On peut voir, avec l'amplitude de ces fourchettes, que la précision escomptée d'une évaluation de l'évaporation à partir d'observations sur bac est assez aléatoire. La meilleure approche reste celle du Colorado, si possible entouré d'une pelouse anneau de garde.

#### L'ÉVAPORATION ET SES APPROCHES ÉNERGÉTIQUES

L'évaporation s'accompagne d'une consommation importante d'énergie. On peut donc établir un bilan énergétique d'un système (constitué autour de l'interface évaporante) dont on formulera l'équation par :

$$R_N + L_e \cdot E + H + G = 0$$

où  $R_N$  : flux de rayonnement net à l'interface sol-atmosphère  
 $L_e$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau  
 $E$  : flux d'évaporation  
 $H$  : flux de chaleur sensible dans la basse atmosphère  
 $G$  : flux de chaleur transmis au sol par conduction.

Cette approche permet de définir différents niveaux d'évaporation selon les conditions aux limites imposées :

- une évaporation "à l'équilibre" :

$$E_{\text{EQU}} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot Q_{\text{ne}}$$

qui concerne une surface évaporante baignée par un air saturé en humidité

- une évaporation "dans des conditions d'advection minimale", dite de Priestley-Taylor :

$$E_{PRT} = \alpha_e \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot Q_{ne}$$

qui concerne de très grandes surfaces évaporantes naturelles (océan)

- enfin l'évaporation de PENMAN :

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

qui concernera les surfaces évaporantes naturelles de toutes dimensions, au prix de l'introduction d'un paramètre supplémentaire  $\lambda$  afin de moduler l'importance du 2ème terme  $(\lambda \cdot \gamma) / (\Delta + \gamma) \cdot E_a$ .

dans ces équations, on a introduit :

$\Delta$  : pente de la courbe de pression de vapeur saturante pour la température T ambiante =  $de^*/dT$

$\gamma$  : constante psychométrique # 0,67 mb.°K<sup>-1</sup>

$Q_{ne}$  : flux d'énergie disponible =  $(R_N - G) / L_e$

$\alpha_e$  : coefficient de Priestley-Taylor = 1,26

$E_a$  : "pouvoir asséchant de l'air" de la formule de PENMAN défini par  $E_a = f(U) \cdot (e^* - e_a)$ , où  $f(U)$  est une fonction de vent,  $e^*$  la pression saturante de vapeur d'eau à la température T,  $e_a$  la pression de vapeur d'eau de l'air.

La fonction de vent peut être définie comme celle proposée par PENMAN (1956) :  $f(U) = 0,26 (0,5 + 0,54 \cdot U)$  (où U est mesurée à 2 m), comme celle proposée pour l'Afrique par RIOU (1972) :  $f(U) = 0,24 \cdot U$ , ou encore celle déterminée localement expérimentalement à partir par exemple des résultats d'un bac d'évaporation.

Toute la difficulté de l'utilisation de la formule de PENMAN repose sur le calcul de  $Q_{ne}$  et de  $E_a$  :

- en ce qui concerne  $Q_{ne}$ , on admet que si l'on choisit une période de référence suffisamment longue, multiple de la journée, on peut admettre que la valeur moyenne de G y est nulle. On se ramène donc à  $Q_{ne} = R_N / L_e$ .  $R_N$  étant rarement mesuré en routine, on le calcule à partir de T,  $e_a$ , S/S<sub>0</sub> (durée d'insolation réelle et théorique), R<sub>g</sub> (Rayonnement global) ou G<sub>0</sub> (rayonnement à l'entrée de l'atmosphère pour la latitude donnée).

Les formules utilisées dans le cas de l'étude du lac de BAM étaient :

$$R_N = (1-a)R_g - \sigma T^4 \cdot (0,4 - 0,05(e_a)^{1/2}) (0,5 + 0,5 \cdot S/S_0)$$

avec a : albedo

$\sigma$  : constante de STEPHAN-BOLTZMANN # 4,92.10<sup>-7</sup> j.cm<sup>-2</sup>.°K<sup>-1</sup>

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

et

$$\Delta = T^2/457 - T/158 + 0,662 \text{ en mb.}^\circ\text{C}^{-1}$$

Les valeurs calculées pour RN, E<sub>EEQU</sub>, E<sub>PRT</sub> et E<sub>PEN</sub> à partir des données de la station SAINT PAUL dépendent bien sûr de la valeur de l'albedo a choisi :

- il est satisfaisant de constater que les estimations par bilan hydrique des valeurs moyennes des mois d'hivernage (août et septembre) sont proches des valeurs calculées de E<sub>DU</sub> pour un albedo a = 0,10, qui est représentatif des eaux troubles dans des conditions proches de celles de l'évaporation "à l'équilibre".

- avec un coefficient de Priestley-Taylor  $\alpha_e$  classique de 1,26 l'évaporation calculée EPRT pour un albedo moyen<sup>e</sup> de 0,08, représentatif des conditions annuelles moyennes du lac de BAM, est de 6,0 mm.j<sup>-1</sup>. E<sub>PRT</sub> sous estime donc d'environ 0,5 mm.j<sup>-1</sup> l'évaporation réelle du lac estimée à 6,4 mm.j<sup>-1</sup> par bilan hydrique. La bonne constante de Priestley-Taylor, cohérente avec les dimensions du lac de BAM serait  $\alpha_e$  : 1,34.

	DONNEES					a = 0,05				a = 0,10			
	TABRI	E2ABRI	U2ABRI	S/S0	RG	Rn	EEQU	EPRT	EPEN	Rn	EEQU	EPRT	EPEN
J	22,3	7,3	1,45	0,82	2091	1085	3,20	4,03	5,71	980	2,89	3,65	5,40
F	25,6	8,0	1,41	0,87	2398	1333	4,13	5,21	6,88	1213	3,76	4,74	6,51
M	29,7	10,4	1,54	0,77	2446	1451	4,73	5,96	7,75	1329	4,33	5,46	7,35
A	32,5	14,2	1,69	0,74	2533	1617	5,42	6,83	8,51	1491	5,00	6,30	8,09
M	32,4	20,6	2,19	0,74	2596	1822	6,10	7,69	8,86	1692	5,67	7,14	8,43
J	30,7	23,0	2,39	0,73	2580	1871	6,16	7,76	8,47	1742	5,74	7,23	8,04
J	27,6	25,1	1,91	0,63	2361	1753	5,58	7,03	6,91	1635	5,20	6,55	6,54
A	26,8	26,3	1,56	0,65	2366	1777	5,60	7,05	6,57	1659	5,22	6,58	6,20
S	27,3	26,2	1,36	0,70	2375	1767	5,60	7,05	6,63	1648	5,22	6,58	6,25
O	28,8	21,4	1,08	0,78	2340	1610	5,20	6,55	6,84	1493	4,82	6,07	6,46
N	25,7	11,7	1,15	0,87	2269	1317	4,09	5,15	6,31	1204	3,74	4,71	5,96
D	23,2	8,7	1,21	0,85	2071	1083	3,24	4,09	5,55	980	2,93	3,69	5,24
M	27,7	16,9	1,58	0,76	2378	1571	5,00	6,30	7,14	1452	4,62	5,83	6,76

Calcul de EEQU, EPRT, EPEN pour des valeurs 0,05 et 0,10 de a en valeurs moyennes mensuelles interannuelles au lac de BAM

D'ailleurs le calcul systématique en données interannuelles des coefficients mensuels  $\alpha_e$  de Priestley à partir des valeurs mensuelles calculées de EEQU et des valeurs mesurées de ELAC pour le lac de BAM et la mare d'OURSIS est très significatif.

	BAM		OURSÍ
	a = 0,05	0,10	0,10
J	1,78	1,97	1,74
F	1,53	1,68	1,65
M	1,48	1,62	1,55
A	1,40	1,52	-
M	1,28	1,38	-
J	1,20	1,29	-
J	1,18	1,27	-
A	0,93	1,0	-
S	0,93	1,0	1,31
O	1,21	1,31	1,31
N	1,56	1,71	1,59
D	1,70	1,88	1,75
M	1,28	1,39	-

Valeur de  $\alpha_e = ELAC/EEQU$

au lac de BAM et à la mare d'OURSÍ

Les valeurs mensuelles de  $\alpha_e$  suivent bien l'importance de l'advection de chaque mois considéré :

- Pour les mois d'hivernage à advection minimale,  $\alpha_e$  reste voisin de 1.
- $\alpha_e$  prend au contraire ses plus fortes valeurs entre novembre et mars, mois de forte advection.

La formule de Priestley-Taylor sous estime donc nettement l'évaporation de nappes d'eau placées en condition advective. Les résultats de RIOU (1972) montrent qu'elle redevient utilisable pour de très vastes étendues d'eau comme le lac TCHAD, pourtant placées en conditions advectives, pour lesquelles la valeur  $\alpha_e = 1,26$  est satisfaisante à l'échelle annuelle.

Les valeurs calculées de EPEN avec le même albedo moyen de 0,08 conduisent à une évaporation annuelle de  $6,91 \text{ mm.j}^{-1}$ , ce qui est manifestement surestimé. Le paramètre  $\lambda$ , introduit par RIOU (1972) dans la formule de PENMAN, permet d'y remédier car il permet un ajustement entre les valeurs de EPEN ainsi calculées et les évaporations ELAC observées. Dans le tableau ci-dessus, qui concerne des moyennes annuelles interannuelles pour  $a = 0,08$ , ont été calculées les valeurs mensuelles de  $\lambda$  résultant de l'égalisation  $EPEN = ELAC$ .

	Rn 0,08 mm.j <sup>-1</sup>	Ea mm.j <sup>-1</sup>	ELAC mm.j <sup>-1</sup>	$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$	EEQU mm.j <sup>-1</sup>	$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot EEQU$ mm.j <sup>-1</sup>	EPEN $\lambda = 1$	ELAC EEQU	$\lambda$
J	4,2	8,8	5,7	0,71	2,98	2,55	5,53	2,72	1,07
F	5,2	11,0	6,3	0,75	3,90	2,75	6,65	2,40	0,87
M	5,7	14,3	7,0	0,79	4,50	3,00	7,50	2,50	0,83
A	6,3	16,4	7,6	0,81	5,10	3,12	8,22	2,50	0,80
M	7,2	14,5	7,8	0,81	5,83	2,76	8,59	1,97	0,71
J	7,4	11,4	7,4	0,80	5,92	2,28	8,20	1,48	0,65
J	6,9	5,8	6,6	0,77	5,31	1,33	6,64	1,29	0,97
A	7,0	4,1	5,2	0,76	5,32	0,98	6,30	-0,12	-0,12
S	7,0	4,4	5,2	0,77	5,39	1,01	6,40	-0,19	-0,19
O	6,3	7,5	6,3	0,78	4,91	1,65	6,56	1,39	0,84
N	5,1	8,9	6,4	0,75	3,82	2,22	6,04	2,58	1,16
D	4,2	8,4	5,5	0,72	3,02	2,35	5,37	2,48	1,06
M	6,2	9,3	6,4	0,77	4,77	2,14	6,91	1,63	0,76

Ces résultats sont significatifs :

- à l'échelle annuelle la part du terme advectif doit être réduite dans un rapport 0,76 pour le lac de BAM. RIOU (1972) avait trouvé 0,59 pour le lac TCHAD, ce qui est cohérent compte tenu des différences des superficies.
- les  $\lambda$  négatifs des mois d'août et septembre résultent du choix unique d'un  $a = 0,08$  inopportun pour les eaux troubles de ces mois d'hivernage.
- durant la saison sèche,  $\lambda$  reste supérieur à 1, traduisant l'importante advection de ces mois très secs et venteux.
- dès la saison sèche chaude,  $\lambda$  redevient inférieur à 1. PENMAN surestime donc encore l'évaporation des grandes nappes d'eau libre.

Ce qui précède montre bien les possibilités qui existent réellement à estimer l'évaporation des grandes nappes d'eau libre à partir des simples données climatologiques. Encore faut-il disposer de données fiables et savoir quelles valeurs, de l'albedo  $a$  ou des coefficients  $\alpha_e$  ou  $\lambda$ , doivent être choisies.

D'autres relations directes existent entre l'évaporation et certaines caractéristiques climatologiques moyennes, comme la température moyenne de l'air, la moyenne des températures maximales, ou encore les rayonnements mensuels nets ou globaux. Mais il s'agit là de formules empiriques utilisables, dans le meilleur des cas, pour un environnement donné seulement.

#### L'ÉVAPORATION DES NAPPES D'EAU LIBRE ET L'APPROCHE PAR LES TRANSFERTS GLOBAUX AÉRODYNAMIQUES.

Depuis DALTON (1802) on sait que l'évaporation est proportionnelle à une fonction de la vitesse du vent ( $f(V)$ ) et au gradient de pression ( $\Delta ELAC$ ) de la vapeur d'eau de l'air baignant la surface évaporante. L'équation de DALTON, dans sa formulation due à STELLING (1882) s'écrit :

$$E = (a+b \cdot U) (e_s - e_a)$$

Malgré des fondements théoriques démontrés ultérieurement, cette équation reste une équation empirique et statistique.

Dans le cas du lac de BAM en opérant en valeurs mensuelles interannuelles, on aboutit aux formules :

$$ELAC = (0,224 + 0,064 \cdot U2) \cdot \Delta ESTA \text{ ou } ELAC = 0,204 \cdot \Delta ESTA \cdot U2$$

selon que l'on adopte des formules monomes ou binomes, avec des coefficients de corrélation voisins de 0,70. Dans ces formules le gradient de pression de vapeur d'eau  $\Delta ELAC$ , différence entre la pression de vapeur d'eau à 2 m au-dessus du lac et la pression de vapeur saturante à la température de la surface évaporante, a été remplacée par  $\Delta ESTA$ , plus accessible aux données, différence entre la pression de vapeur d'eau sous l'abri de la station de référence et la pression de vapeur saturante à la

température superficielle d'un bac évaporant. Malgré ces approximations considérables, les résultats restent honorables et peuvent être grandement améliorés en introduisant l'advection (par l'adjonction d'un terme en  $1/U_2$ ) et de la stabilité atmosphérique (par introduction d'un terme en  $\Delta T$ , différence entre la température superficielle d'un bac et la température sous abri).

La corrélation  $ELAC/\Delta ESTA.U_2 = 0,078 + 0,207/U_2 + 0,006 \cdot \Delta T$  a un coefficient de corrélation de 0,96.

Mais il est aussi possible de corrélérer directement l'évaporation avec  $\Delta ESTA$  et  $U_2$ . Toujours en moyennes mensuelles interannuelles, on aboutit ainsi aux formules suivantes :

$$ELAC = 0,34 + 0,202 \cdot \Delta ESTA + 1,31 \cdot U_2 \quad r = 0,96$$

$$ELAC = 0,830 \cdot \Delta ESTA^{0,637} \cdot U_2^{0,321} \quad r = 0,94$$

Ces formules, et leurs coefficients de corrélations attractifs ne doivent cependant pas masquer le fait qu'elles sont très difficilement transposables. Leur principal mérite est en fait de pouvoir être étendues à des échelles de temps beaucoup plus courtes, inférieures au jour ou même à l'heure, et qu'elles complètent bien, à cette échelle de temps et sur un profil, l'approche énergétique de l'évaporation, de façon à la définir très finement.

#### CONCLUSION

Cette communication s'est attachée à montrer qu'il existait un certain nombre de méthodes qui selon l'importance, la qualité et la proximité des données existantes, permettraient à l'aménagiste une évaluation raisonnable de l'évaporation prévisible sur un aménagement à créer.

Selon les échelles de temps et d'espace choisies (quelle est la taille de la retenue et sur quel pas de temps recherche-t-on l'évaporation) plusieurs réponses sont possibles :

- la méthode du bilan hydrique n'est, dans le meilleur des cas, applicable qu'aux pas de temps mensuels, voire dans certains cas annuels. Cette méthode n'est néanmoins jamais à négliger car elle fournit des estimations globales qui servent de garde-fou aux méthodes plus sensibles, mais moins précises.
- les corrélations avec les résultats des bacs évaporatoires sont en général aussi très satisfaisantes au pas de temps annuel, ou mieux encore au pas de temps mensuel, avec donc des "coefficients de bacs" mensuels se rapportant aux conditions climatiques de chaque mois considéré. A ce titre les valeurs de ces coefficients définies pour les différents bacs pour l'étude du lac de BAM, OURSI et le lac TCHAD, sont autant de bornes qui jalonnent l'évaluation de l'évaporation dans des cas originaux, mais comparables.
- L'approche énergétique apparaît au contraire, à cette échelle spatiale, beaucoup mieux adaptée pour des pas de temps allant de la semaine au mois, susceptibles d'être combinés pour constituer des ensembles annuels, accessibles aussi directement par cette méthodologie. Dans ce contexte le concept d'évaporation à l'équilibre ( $E_{EQU}$ ) fournit une valeur-plancher de l'évaporation sur grande nappe d'eau libre, atteinte habituellement seulement pendant l'hivernage.

l'utilisation au pas de temps mensuel de l'approche de PRIESTLEY-TAYLOR fournit une bien meilleure estimation des évaporations mensuelles à condition d'adapter les coefficients mensuels, d'abord pour tenir compte de l'importance des surfaces évaporantes et ensuite de l'advection variable en intensité d'un mois à l'autre. On peut rappeler à ce sujet que la valeur  $\alpha_e = 1,26$  de Priestley-Taylor n'est atteinte en valeur annuelle que pour de très grandes surfaces de quelques km<sup>2</sup>. En valeurs mensuelles les  $\alpha_e$  des mois à très forte advection peuvent dépasser 1,7 à 1,8.

l'approche de PENMAN enfin, à condition de choisir des valeurs convenables de l'albedo  $a$  et d'introduire dans la formule devant le terme advectif le  $\lambda$  correcteur introduit par RIOU, conduit aux meilleures évaluations de l'évaporation pour des pas de temps hebdomadaires ou mensuels pour lesquels cette méthode est fort bien adaptée. L'extrapolation brutale à des pas de temps annuels ou au contraire journaliers est par contre souvent beaucoup plus hasardeuse.

l'utilisation de formules empiriques du type DALTON et améliorées est toujours possible, à condition toutefois que des études régionales préalables aient permis un "calage" des coefficients.

En définitive, et malgré les apparences, il n'est jamais facile d'estimer a priori l'évaporation d'une nappe d'eau libre. Le fait qu'il ne soit pas non plus beaucoup plus aisé de mesurer cette même évaporation sur une retenue existante explique les difficultés constantes à appréhender ce paramètre important du cycle hydrologique.

## REFERENCES

- Brutsaert, W. (1982). Evaporation into the Atmosphere. D. Reidel Publishing Comp. London. 299 p.
- Chouret, A. (1974). Les effets de la sécheresse actuelle en Afrique sur le niveau du lac TCHAD. Cahiers de l'ORSTOM, Hydrologie, vol. XI, n°1.
- Chevallier, P., Claude, J., Pouyaud, B., Bernard, A. (1984). Pluies et Crues au Sahel. Coll. Travaux et Documents N°190. Edition de l'ORSTOM. 252 p.
- Ibiza, D. (1972). Mesure de l'évaporation d'un lac en climat sahélien. Lac de Bam. Cahiers de l'ORSTOM, Hydrologie. Vol. IX n°3.
- Morton, F.I. (1979). Climatology estimates of lake evaporation. Water Resources Research, vol 15, n°1, pp. 64-76.
- Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc. Roy. Soc. London, A 193, 120.146.
- Pouyaud, B. (1985). Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Coll. Etudes et Thèses. Edition ORSTOM. 254 p.
- Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameter. Monthly Weath. Rev. 100, 81-92.
- Riou, C. (1972). Etude de l'Evaporation en Afrique Centrale. Coll. Etudes et Thèses. Edition ORSTOM.
- Roche, M. (1963). Hydrologie de Surface. Gauthiers-Villars. ORSTOM.
- Seguin, B., Brunet, Y., and Perrier, A. (1982). Estimation of evaporation : a review of existing Methods and Recent Developments. E.G.S. Meeting Symposium on Evaporation, Leeds (G.B.).