

# UN LOGICIEL DE RÉGIONALISATION CLIMATO-HYDROLOGIQUE. APPLICATION AU BILAN HYDROLOGIQUE DE LA CUVETTE DU LAC TITICACA

M.A. ROCHE<sup>1</sup>

---

## RÉSUMÉ

Les termes du bilan hydrologique, permettant l'évaluation d'une évapotranspiration réelle (ETR) régionale, sont étudiés dans l'espace et dans le temps à l'aide d'un logiciel. Les données de précipitations mensuelles sont homogénéisées par la méthode de pseudo-proportionnalité des séries. Une division de l'ensemble régional est effectuée en bassins élémentaires, qu'il est possible de regrouper selon les nécessités. Les lames moyennes sont estimées sur ces bassins. Les données hydrométriques sont aussi traitées par le logiciel qui permet finalement le calcul du bilan. Différents fichiers de données homogénéisées peuvent servir à obtenir facilement plusieurs évaluations pour chaque terme, dont différentes combinaisons définissent une gamme de valeurs d'ETR.

L'application a été effectuée pour la cuvette du lac Titicaca.

---

<sup>1</sup> Directeur de recherche Orstom, Montpellier.

## ÉVAPOTRANSPIRATION RÉGIONALE ET BILAN HYDROLOGIQUE

L'évapotranspiration réelle (ETR) est généralement le terme le plus mal connu du cycle de l'eau. En effet, sa mesure ponctuelle, et *a fortiori* l'extension régionale de valeurs ponctuelles obtenues par diverses méthodes, s'avère très délicate. C'est pourquoi le principe de la confrontation de résultats d'origines variées, avec leurs marges d'incertitude propres, doit être retenu comme règle pour cerner la valeur la plus probable de ce terme.

Parmi les différentes méthodes, l'établissement du bilan hydrologique est l'une des plus précises pour aboutir à une évaluation pluriannuelle. Il est incontournable pour la confrontation des évaluations régionales de l'évapotranspiration. L'ETR est dans ce cas la somme algébrique des autres termes du bilan hydrologique, équivalant alors au déficit d'écoulement.

## UN LOGICIEL POUR LE BILAN HYDROLOGIQUE RÉGIONAL

Il est devenu plus aisé grâce à l'informatique d'établir les différents termes du bilan hydrologique de vastes régions. Des travaux sur ce thème ont été menés dans le cadre du programme climatologique et hydrologique de la Bolivie (PHICAB), en coopération entre l'Orstom, l'Instituto de hidráulica e hidrología et le Servicio de meteorología e hidrología.

Les premiers éléments de logiciel (Climar2) ont fait l'objet d'une publication préliminaire (ROCHE, 1988 a,b). Ils ont été ensuite complétés (TITWABAL) et appliqués à l'établissement du bilan de la cuvette du lac Titicaca dont les résultats ont été publiés antérieurement (ROCHE *et al.*, 1991). Cette note s'attache à présenter la méthodologie et l'outil dans un contexte d'application. En ce domaine, il est à signaler les travaux de HIEZ (1977), COCHONNEAU *et al.*, (1991), et MAHÉ (1992).

Le logiciel permet d'effectuer un traitement spatial et temporel de paramètres climatologiques, de la pluviométrie notamment, des débits entrants et sortants, et de niveaux lacustres. Les données de bases sont mensuelles et les pas de temps des résultats sortants sont mensuels, annuels et pluriannuels. Spatialement, les résultats sont obtenus par postes, puis par bassins élémentaires ou groupes de bassins et enfin pour l'ensemble de la région prise en considération. Les termes pluviométriques et hydrométriques sont automatiquement composés pour tout bassin, et à volonté pour tout groupe de bassins, à ces divers pas de temps, pour le calcul du bilan.

Ce traitement fournit aussi des chroniques prêtes à l'analyse de la variabilité spatio-temporelle.

## **LES DONNÉES**

Les données originales qui constituent les entrées brutes sont les suivantes :

- \* les superficies des bassins ;
- \* la liste des stations d'observations climatologiques et hydrométriques et de leurs caractéristiques ;
- \* les superficies des polygones de Thiessen ;
- \* les précipitations mensuelles ;
- \* les paramètres de l'évaporation : température, radiation et durée d'insolation, nébulosité, humidité relative, vitesse du vent (destinés à d'éventuels calculs d'évapotranspiration) ;
- \* les données hydrométriques (débits entrants et sortants, niveaux du lac).

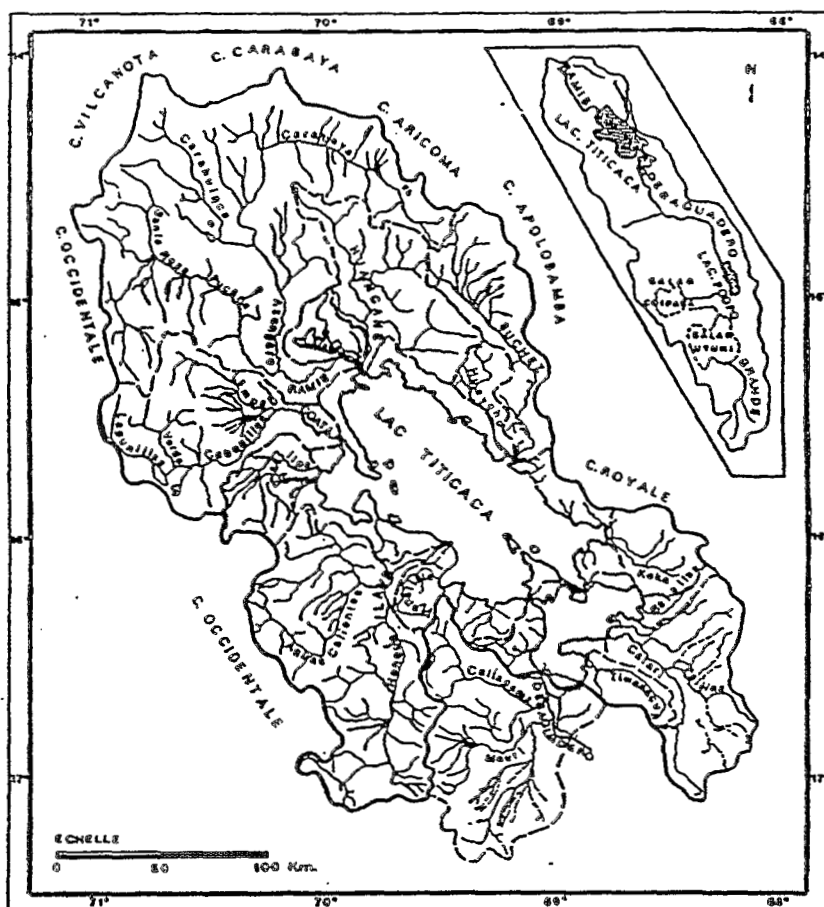
## **RÉGIONALISATION DE LA CUVETTE DU LAC TITICACA**

Un des intérêts d'établir le bilan hydrologique de la cuvette du lac Titicaca réside en l'évaluation de l'évaporation d'un vaste plan d'eau, et de l'évapotranspiration réelle d'un complexe terrain-couverture végétale de montagne de haute altitude, en région intertropicale.

Selon les résultats de l'étude, le bassin du lac Titicaca s'étend en Bolivie et au Pérou sur 57 500 km<sup>2</sup>, eaux superficielles comprises (figure 1). Le lac, à l'époque actuelle, est la seule étendue d'eau superficielle vraiment pérenne dans le bassin andoréique de l'Altiplano : 8 488 km<sup>2</sup>, profondeur maximum 285 mètres. Son niveau moyen, situé à l'altitude de 3 806 mètres, outre une variation annuelle, subit à l'échelle pluriannuelle des fluctuations de niveau.

Sur la période 1968-1989, le lac Titicaca est alimenté par les apports de ses tributaires (53 %) et par les pluies qui tombent directement sur sa surface (47 %). Les pertes du lac sont assurées à 91 % par l'évaporation, le Rio Desaguadero évacuant superficiellement 9 % des eaux lacustres en direction du lac Poopo.

Un total de 51 bassins dits « élémentaires », sont pris en considération comme division de base (figure 2a). Ces bassins élémentaires sont combinés en 32 grands bassins dont 14 peuvent être considérés comme « principaux », leur ensemble assurant la totalité des apports fluviaux au lac (figure 2b).

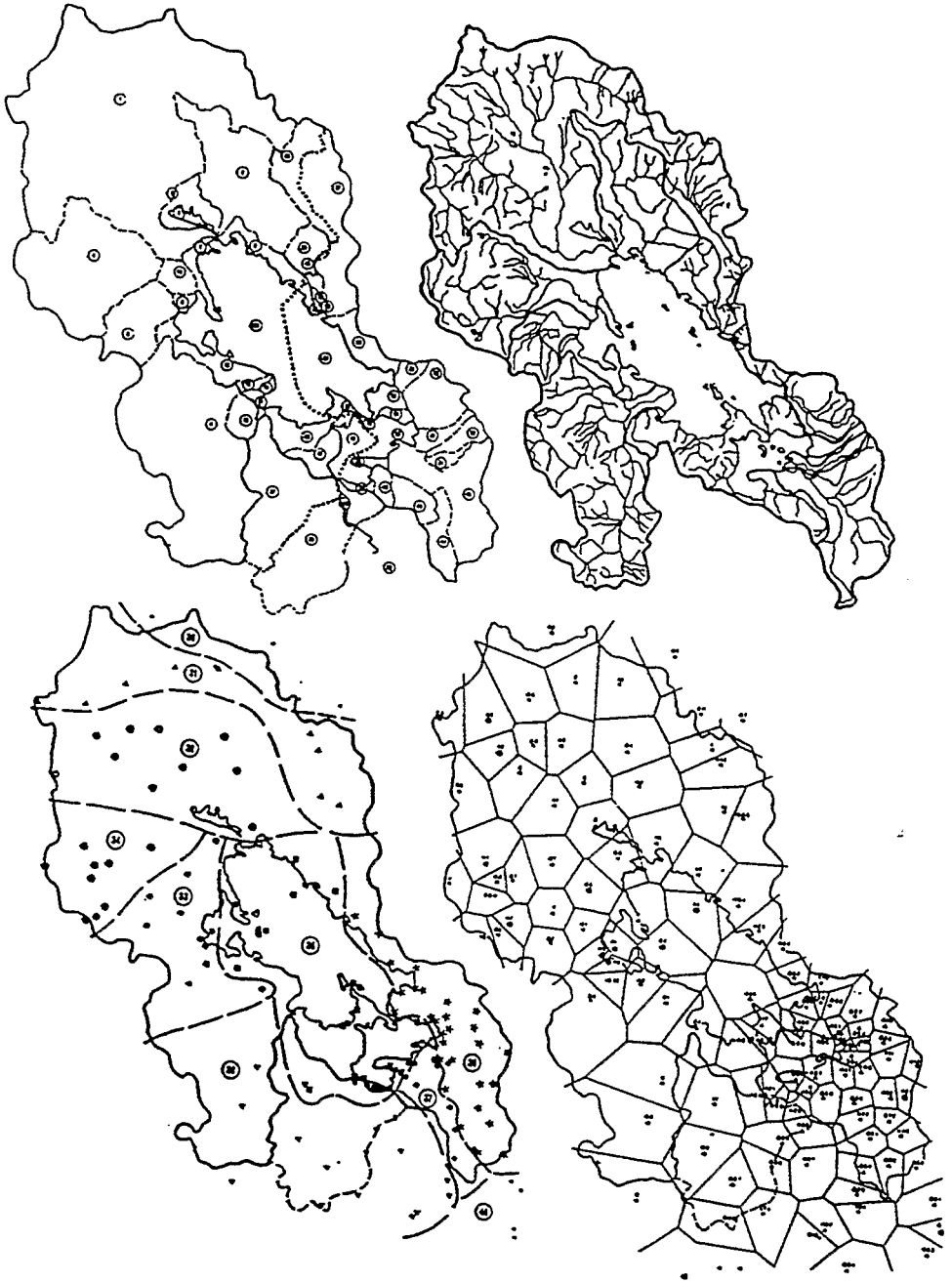


**Figure 1**

*Système hydrologique de l'Altiplano boliviano-péruvien. Hydrologie de la cuvette du lac Titicaca*

## LES PRÉCIPITATIONS

L'ensemble de l'information pluviométrique de 112 stations, réparties en 9 groupes (figure 2c), a été homogénéisée mensuellement et annuellement afin de procéder à l'estimation des précipitations moyennes par bassin (figure 2d) et à l'étude des variations temporelles. La méthode du vecteur spatio-temporel (Vecspat, logiciel Climar2), avec pour module statistique la médiane des séries, est utilisée (ROCHE, 1988b). Ce traitement matriciel est basé sur la pseudo-proportionnalité des données (HEZ, 1977). Le logiciel, entièrement automatique pour un groupe de stations, permet une ample édition de tableaux et de graphiques, pour chaque mois, année et station (figure 3). En plus du fichier



**Figure 2**

*Bassins élémentaires (a), bassins principaux (b), groupes de stations pluviométriques (c), et division de Thiessen (c), de la cuvette du lac Titicaca*

original saisi, il fournit un fichier complété, dont les lacunes sont estimées, et un fichier entièrement calculé. Il crée aussi des fichiers de vecteurs spatio-temporels mensuels et annuels. Les résultats offrent de larges possibilités de critique des données.

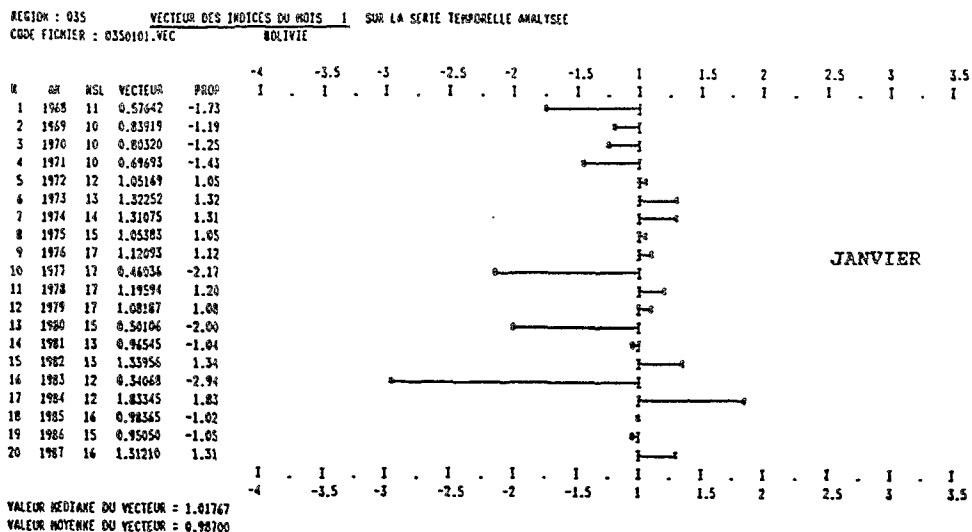
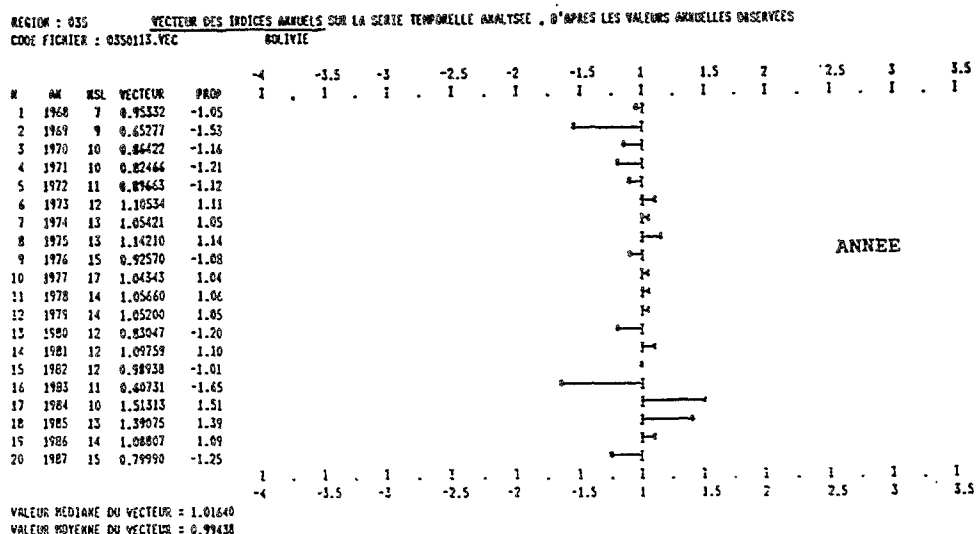


Figure 3

Vecteurs temporels de la région du lac Titicaca (numéro 35) pour les précipitations du mois de janvier et annuelles

Les précipitations moyennes mensuelles sont calculées systématiquement par bassin élémentaire ou tout groupe défini de bassins, les bassins principaux notamment. La pondération des pluies aux stations est faite par les coefficients de Thiessen correspondants (figure 2d). Les polygones sont subdivisés manuellement, selon le tracé des limites de bassins qui les recourent. Le logiciel additionne les superficies des polygones et calcule les coefficients de Thiessen par bassin. Ceux-ci sont calculés automatiquement en continu ou séparément pour tout groupe de bassins pour lequel on souhaite calculer une pluie moyenne.

Comme exemple de résultats, la variation des précipitations mensuelles sur les 20 années, correspondant à la période d'homogénéisation, a été tracée pour les principaux bassins (figure 4). Toutes les compositions de bassins sont permises. La distribution interannuelle des pluies mensuelles par bassin est illustrée par des histogrammes moyens (figure 5). Ce type de graphique est présenté pour les bassins principaux et l'ensemble du lac.

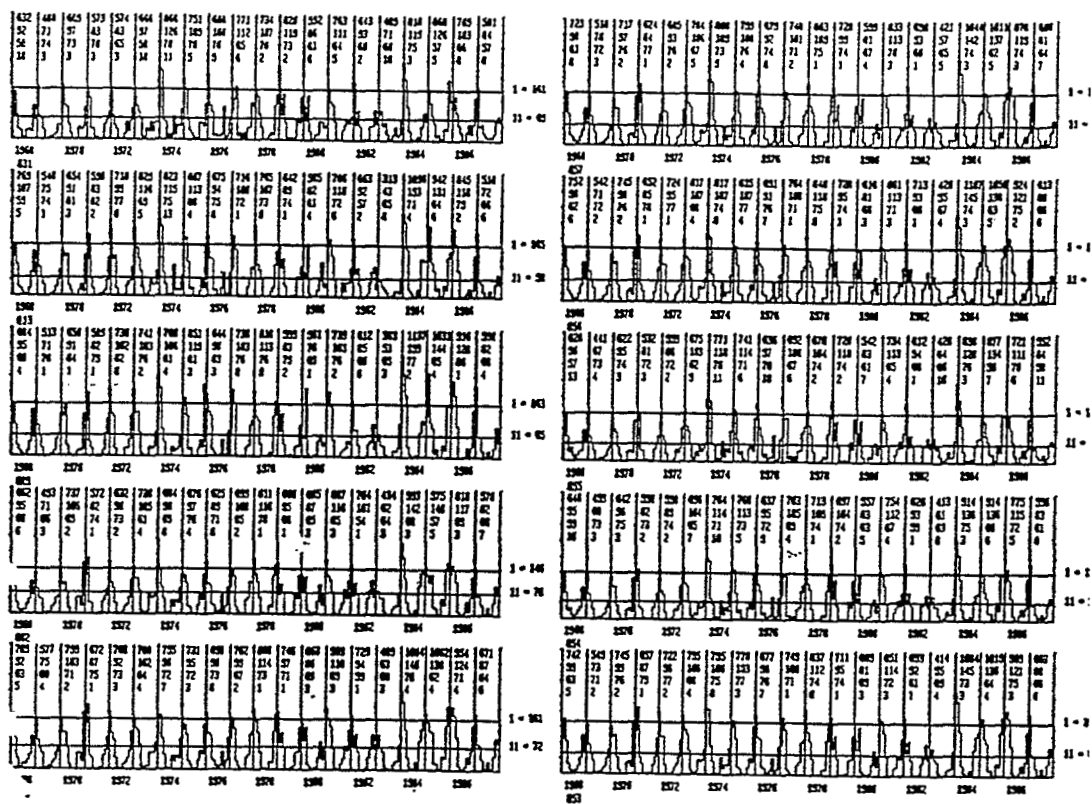
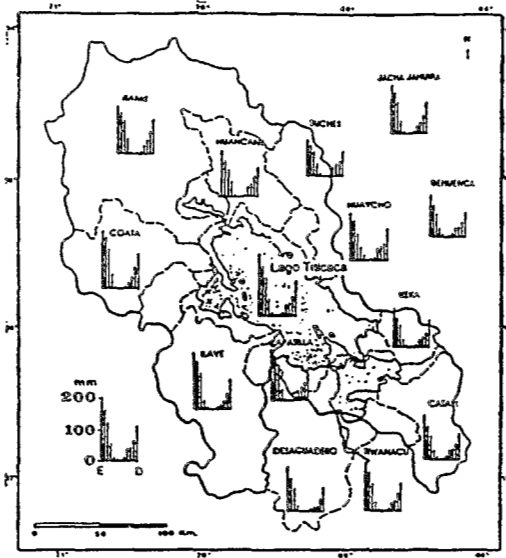


Figure 4

Variation des précipitations mensuelles complétées par homogénéisation sur de grands bassins de la cuvette du lac Titicaca



**Figure 5**  
Distribution  
interannuelle des  
précipitations  
mensuelles sur les  
grands bassins de la  
cuvette du lac Titicaca

## LES HAUTEURS D'EAU

Les hauteurs journalières des eaux du lac sont contrôlées sur le graphique de la variation temporelle des valeurs. Cette courbe facilite, outre la critique, l'estimation des lacunes par interpolation. Les valeurs journalières ainsi complétées sont traduites de pouces en centimètres puis lissées par la méthode des moyennes mobiles, calculées ici sur 5 jours. Un tracé définitif de la variation temporelle est à nouveau réalisé pour ces nouvelles hauteurs (figure 6).

À partir des valeurs lissées, sont extraits plusieurs autres fichiers spécifiques, utiles pour les traitements ultérieurs : les hauteurs du premier de chaque mois, du 15 de chaque mois, les maximums et minimums par cycle annuel, les différences de niveau entre le premier du mois et le premier du mois suivant, etc.



**Figure 6**

Extrait de la courbe de variation de la moyenne mobile (5 jours) des niveaux journaliers du lac Titicaca (zéro d'échelle : 3809,93)



## LES DÉBITS

Au Pérou, sur un total de sept stations hydrométriques installées sur les tributaires, cinq d'entre elles mesurent les apports directs au lac. Les proportions de superficie de ces bassins, observés par rapport à la superficie totale des bassins péruviens, est de 80,3 % et de 63,5 % par rapport à l'ensemble du bassin de terre ferme de la cuvette.

En Bolivie, les débits sont mesurés à six stations. Les périodes d'observation y sont plus courtes que celles des données du Pérou. Pour ces cours d'eau, des séries de débits suffisamment longues n'étaient pas encore disponibles au moment de la réalisation de cette étude. Aussi a-t-il semblé préférable, pour tester le fonctionnement du logiciel, d'utiliser uniquement les données des bassins péruviens, et d'évaluer les débits manquant pour le reste de la cuvette.

Les débits moyens mensuels des tributaires observés présentent peu de lacunes.

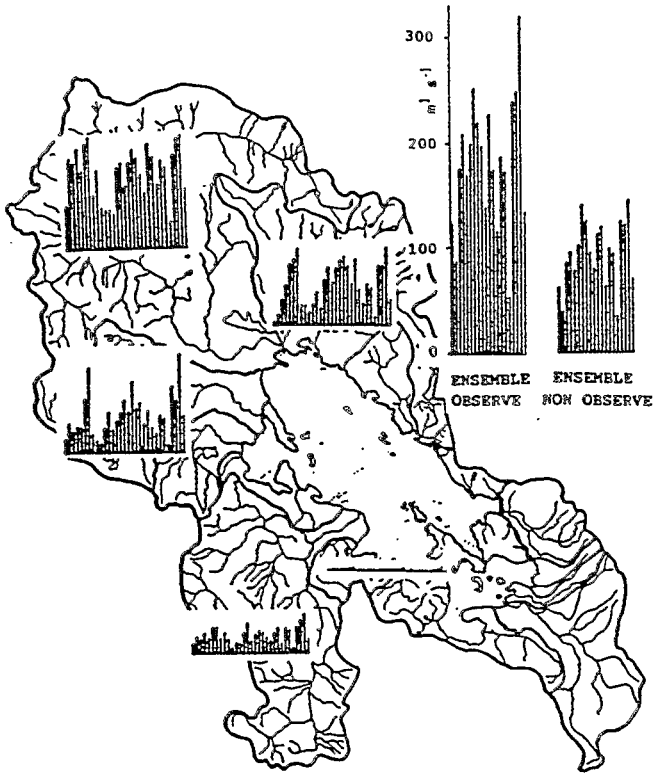
Les corrélations entre débits annuels ne sont pas satisfaisantes. La recherche de corrélations entre débits mensuels seraient à étudier ainsi que celles entre débits mensuels et précipitations ou indices d'humidité calculés à partir de ces précipitations. La mise au point d'un logiciel de recherche systématique du meilleur indice est en cours.

Les débits observés aux stations sont homogénéisés par la méthode Vecspat qui implique une pseudo-proportionnalité des débits entre bassins.

Les débits moyens mensuels inconnus sont évalués pour tout bassin élémentaire ou groupe de bassins sans contrôle hydrométrique, à partir de ceux d'un autre bassin ou groupe de bassins pour lequel une série homogénéisée est disponible. À cette fin, sont utilisés les rapports des superficies, les pluies moyennes, et des coefficients d'écoulement annuels choisis. Il est possible d'obtenir plusieurs estimations de débits, en faisant varier le coefficient d'écoulement du bassin non observé.

Toute série de débits mensuels peut être transformée automatiquement en lame ou en volume. Différents tracés d'histogrammes de débits mensuels, annuels et pluriannuels sont dessinés sur traceur. Ils sont du type de ceux qui peuvent être obtenus pour les précipitations. Les diagrammes de la figure 7 représentent par exemple la variation des modules des bassins élémentaires observés (1957-1987), ainsi que ceux de l'ensemble de ces bassins et des bassins non observés pour lesquels a été effectuée une évaluation (1968-1987).

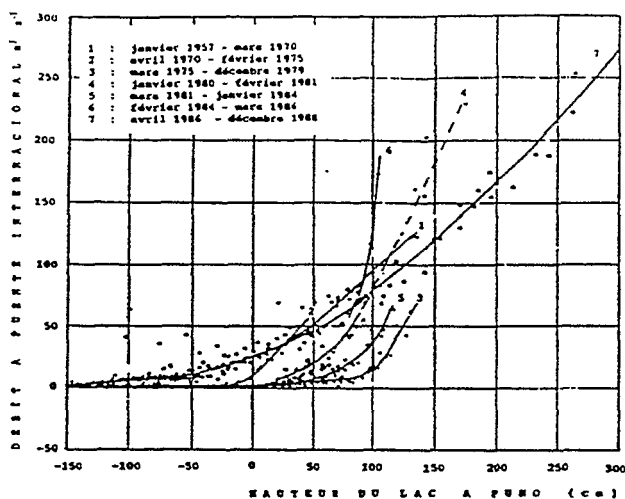
Les débits sortants du lac par le Desaguadero au Pont international présentent quelques lacunes qui peuvent être estimées par interpolation compte tenu du régime régulier de cet exutoire.



**Figure 7**

*Variations des modules tributaires sur les bassins élémentaires observés (1957-1987), l'ensemble de ces bassins et l'ensemble des bassins non observés pour lesquels une évaluation a été effectuée (1968-19807)*

La relation entre les débits sortants et les niveaux du lac à Puno montre une grande dispersion (figure 8). L'analyse de ces résultats et la connaissance du terrain laissent entrevoir un système complexe, ou interviendraient seuils bathymétriques, végétation aquatique et influence hydraulique des affluents en aval, rendant la station non-univoque. Il est même reporté qu'en période de bas niveau lacustre, les eaux du Desaguadero, en provenance d'affluents aval s'écouleraient vers le lac, avec donc une inversion du courant. Ce phénomène n'apparaît pas dans les chroniques de débits. La mauvaise qualité des observations, notamment la variation du zéro d'échelle limnimétrique au cours de la période n'est pas également exclue. En l'absence d'éléments décisifs pour expliquer de telles variations, un essai de reconstitution des débits mensuels en fonction du niveau lacustre a aussi été fait. Ces différents tracés et reconstitutions sont effectués par le logiciel.



**Figure 8**  
Relations entre les débits du Desaguadero à Puente internacional et les niveaux du lac Titicaca à Puno, au cours de diverses périodes

## LE BILAN ET L'ÉVAPOTRANSPIRATION

Le calcul du bilan des bassins est réalisé à partir des fichiers mensuels de débits et de lames de précipitations. Pour le lac, interviennent en outre dans le calcul la variation mensuelle du stock d'eau et les débits sortants. Les débits perdus par infiltration à travers les fonds du lac, ainsi que ceux entrant par décharge des nappes dans le lac, pourraient être intégrés sans difficulté au bilan si leurs valeurs étaient connues. Ce n'est pas le cas puisque ces phénomènes eux-mêmes sont mal appréhendés, même si l'on pense que les apports souterrains (GUYOT et GUMIEL, 1990) sont supérieurs aux pertes souterraines. Ces termes, de valeurs opposées et probablement faibles, n'ont donc pas été pris en considération dans les calculs.

Les débits peuvent être introduits en mètres cubes par seconde, et les pluies et les niveaux du lac en millimètres. Les résultats mensuels sont enregistrés en lame et édités en lame et en volume, avec mention des valeurs annuelles et interannuelles.

Le bilan du lac, établi selon différentes combinaisons de fichiers homogénéisés, conduit à des valeurs d'évaporation interannuelle comprises entre des extrêmes de 1 485 mm et 1 745 mm. Le bilan fournit une valeur d'évaporation de 1 625 mm (tableau I), avec les données mensuelles de pluies et débits homogénéisées calculées, celles des débits bruts du Desaguadero, et un coefficient d'écoulement de 20 % pour les bassins non observés. Compte tenu du choix arrêté pour l'évaluation des débits du Desaguadero, une évaporation du lac de 1 628 mm ressort finalement comme la plus probable. Une marge d'incertitude de  $\pm 3$  % appliquée à ce résultat permet de couvrir la gamme de valeurs ressortant de la plupart des combinaisons.

L'ETR interannuelle des bassins est comprise entre 490 et 660 mm selon les sites. Une moyenne de 563 mm est évaluée pour l'ensemble de la cuvette de terre ferme.

## CONCLUSION

L'évaluation mensuelle des termes du bilan hydrologique sur une mosaïque de bassins versants fluviaux ou lacustres, que l'on peut regrouper à volonté pour obtenir des compositions régionales sans limite de superficie, se trouve améliorée par l'utilisation d'un logiciel spécifique. Au plan méthodologique, ce logiciel répond à la nécessité d'un transfert d'échelle. Il est constitué de nombreuses fonctions de traitement de données, notamment la critique et l'homogénéisation mensuelles par pseudo-proportionnalité, le calcul de lames moyennes, des corrélations de fichiers, des tracés graphiques et la somme des termes du bilan. Basé sur des données mensuelles, il fournit des résultats au même pas de temps, mais aussi au pas annuel et pluriannuel.

La méthode utilisée offre de plus la possibilité de cerner les incertitudes sur les données et les résultats. En effet, en facilitant la préparation et l'emploi successifs de divers types de données (homogénéisées, complétées ou recalculées), elles-mêmes soumises parfois à d'autres marges d'incertitude (choix de coefficients d'écoulement sur les bassins non observés), de multiples combinaisons peuvent être évaluées. Il est en effet logique que seule la confrontation de divers résultats avec des marges d'incertitude définies, obtenus par différentes méthodes (appareils, télédétection, formules, bilans, ...), permette d'arrêter des valeurs régionales optimales.

La méthode et l'outil ont été appliqués pour la première fois au bilan de la cuvette du lac Titicaca.

Ainsi, en ce qui concerne le lac Titicaca, les combinaisons des résultats obtenus pour chaque terme du bilan conduisent à une estimation de l'évaporation interannuelle comprise entre 1 485 mm et 1 745 mm, avec une valeur probable de 1 628 mm. Un intervalle d'incertitude de  $\pm 3$  % sur cette valeur couvre la plupart des évaluations.

Les anomalies constatées mensuellement pour l'évaporation du lac (tableau 1, valeur annuelle 1 625 mm) résultent des erreurs dont peuvent être entachés les différents termes du bilan. Il semble cependant que les valeurs extrêmes soient liées à la pente du plan d'eau du lac. En effet, le basculement engendré par les vents dominants doit pouvoir atteindre à certaines périodes plusieurs dizaines de centimètres d'une rive à l'autre. Ce phénomène doit influencer fortement sur la station de Puno située dans une baie de la rive ouest. La prise en considération d'autres stations hydrométriques semble donc indispensable.

Il reste à confronter ces résultats d'évaporation avec ceux obtenus par l'établissement du bilan de radiations et autres formules (ROCHE, 1988a). Les gradients d'altitude exceptionnels du bassin du lac compliquent encore le choix de divers coefficients dont ces formules sont généralement riches.

**Tableau 1**  
Bilan moyen mensuel, calculé sur le lac Titicaca

## Caractéristiques du bassin et de la période

nom du bassin : Titicaca

code bassin : 10 TIT

configuration : 1

code période : 1

année initiale : 1968

année finale : 1987

apports et pertes calculés

code de l'apport fluvial à additionner : 3+

code de l'apport fluvial à additionner : 4+

code de l'apport fluvial à additionner : 800-

code de l'apport en lame à additionner : 5+

code de l'apport en lame à soustraire : 12-

code fichier : B10 TIT1.CAL Lame en millimètres

| N         | AN   | J      | F     | M      | A      | M      | J      | J      | A      | S      | O      | N      | D      | AN      | VOLUME 10E6 m3 |
|-----------|------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|----------------|
| 1         | 1968 | 124.9  | 62.3  | 30.2   | 112.4  | 200.8  | 134.8  | 142.0  | 103.7  | 128.9  | 125.5  | 124.7  | 168.9  | 1459.2  | 12385.3        |
| 2         | 1969 | -13.9  | 116.1 | 71.0   | 110.8  | 268.5  | 169.0  | 114.0  | 115.4  | 111.2  | 137.9  | 122.6  | 136.0  | 1458.7  | 12381.8        |
| 3         | 1970 | 160.5  | 142.0 | 132.9  | 118.6  | 171.1  | 125.4  | 141.5  | 125.3  | 96.0   | 146.8  | 148.2  | 179.8  | 1688.1  | 14328.4        |
| 4         | 1971 | 99.4   | 26.5  | 153.9  | 186.7  | 170.5  | 152.0  | 139.1  | 119.8  | 123.8  | 143.4  | 132.6  | 111.9  | 1559.7  | 13238.5        |
| 5         | 1972 | 192.7  | 134.6 | 125.7  | 178.9  | 143.2  | 151.6  | 132.8  | 133.3  | 87.6   | 151.2  | 134.8  | 99.5   | 1666.0  | 14141.2        |
| 6         | 1973 | 140.6  | 158.3 | 133.6  | 156.8  | 156.4  | 148.8  | 140.1  | 131.2  | 126.5  | 105.9  | 139.5  | 155.6  | 1693.1  | 14371.3        |
| 7         | 1974 | 156.6  | -49.4 | 204.5  | 171.6  | 156.6  | 168.4  | 116.4  | 107.0  | 93.1   | 138.5  | 140.3  | 133.7  | 1537.2  | 13047.4        |
| 8         | 1975 | 115.0  | 85.6  | 173.9  | 180.5  | 180.6  | 150.9  | 139.7  | 135.5  | 126.0  | 133.0  | 159.1  | 119.6  | 1699.5  | 14425.4        |
| 9         | 1976 | 221.9  | 164.4 | 203.3  | 193.2  | 158.0  | 136.2  | 152.0  | 158.9  | 129.0  | 146.6  | 157.1  | 138.6  | 1959.2  | 16629.8        |
| 10        | 1977 | 137.9  | 86.3  | 168.3  | 151.4  | 166.4  | 132.7  | 139.9  | 148.1  | 111.6  | 126.0  | 123.6  | 119.2  | 1611.4  | 13677.4        |
| 11        | 1978 | 182.1  | 90.0  | 111.1  | 149.0  | 161.2  | 145.1  | 139.3  | 146.8  | 123.4  | 149.9  | 103.6  | 120.5  | 1621.9  | 13766.5        |
| 12        | 1979 | -9.5   | 116.4 | 157.0  | 142.5  | 165.6  | 153.9  | 156.6  | 135.8  | 135.2  | 130.2  | 174.9  | 109.4  | 1568.1  | 13310.1        |
| 13        | 1980 | 128.6  | 101.1 | 115.2  | 159.2  | 159.5  | 125.7  | 158.3  | 101.3  | 111.3  | 122.7  | 152.1  | 128.6  | 1563.7  | 13272.6        |
| 14        | 1981 | 105.4  | 70.4  | 131.9  | 126.9  | 141.4  | 151.3  | 140.5  | 145.3  | 145.3  | 124.9  | 116.7  | 156.7  | 1556.6  | 13212.0        |
| 15        | 1982 | 131.8  | 146.3 | 146.3  | 181.5  | 173.5  | 166.8  | 124.8  | 141.4  | 133.4  | 143.6  | 152.5  | 169.0  | 1810.8  | 15370.2        |
| 16        | 1983 | 167.7  | 120.0 | 167.2  | 103.8  | 192.7  | 161.6  | 164.2  | 123.0  | 124.9  | 119.4  | 141.4  | 118.2  | 1704.1  | 14464.2        |
| 17        | 1984 | 78.0   | 9.2   | 105.7  | 90.9   | 130.8  | 135.3  | 134.3  | 147.4  | 138.0  | 112.0  | 130.2  | 118.7  | 1330.4  | 11292.8        |
| 18        | 1985 | 169.8  | 92.5  | 118.1  | 134.3  | 153.7  | 142.1  | 143.5  | 126.4  | 119.9  | 127.5  | 117.6  | 131.6  | 1576.9  | 13384.5        |
| 19        | 1986 | 228.8  | 29.6  | 115.5  | 121.6  | 196.1  | 231.4  | 204.6  | 133.6  | 129.7  | 159.2  | 152.9  | 140.1  | 1843.2  | 15645.1        |
| 20        | 1987 | 24.1   | 132.1 | 146.3  | 148.9  | 183.4  | 148.7  | 168.1  | 125.8  | 131.7  | 129.7  | 124.4  | 122.4  | 1585.5  | 13457.5        |
| -----     |      |        |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |                |
| TOTAL     |      | 127.1  | 91.7  | 135.6  | -446.0 | 171.5  | 151.6  | 144.6  | 130.3  | 121.3  | 133.7  | 137.4  | 133.9  | 1624.7  | 13790.1        |
| V 10E6 m3 |      | 1079.0 | 776.4 | 1150.8 | 1239.0 | 1455.7 | 1286.6 | 1227.3 | 1105.6 | 1029.9 | 1134.7 | 1166.6 | 1136.5 | 13790.1 |                |
| -----     |      |        |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |                |
|           |      |        |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         | MOY. CCL       |

La connaissance des débits du Desaguadero, malgré la faible importance relative des valeurs en période de moyennes et basses eaux du lac, devra être améliorée par des techniques de jaugeage appropriées.

L'obtention d'une série acceptable de valeurs de l'évaporation, complète ainsi la connaissance de tous les termes essentiels du bilan hydrologique, permettant alors, en une deuxième phase, la réalisation de simulations prenant en compte ce paramètre. Parmi les simulations à réaliser, des essais de reconstitution des fluctuations pléistocènes des niveaux du lac et sur l'Altiplano en général (lac Poopo-Salars) constituent un des pôles d'intérêt.

La méthodologie de régionalisation mise au point peut encore être complétée notamment par la programmation de quelques compléments au logiciel Vecspat. Par ailleurs, le découpage de Thiessen présente l'intérêt par rapport aux courbes d'isovaleurs (fonction spline) de fournir des indices de densité de stations. Les deux présentations, et notamment les courbes d'isovaleurs, sont cependant nécessaires. C'est pourquoi un logiciel de tracé des polygones de Thiessen et le calcul automatique des coefficients qui y sont attachés serait également utile. Il permettrait de franchir un pas qui demeure fastidieux : celui du tracé et du planimétrage des polygones, même pour un nombre fixe de stations. La différence entre les résultats de lames moyennes évaluées par les deux méthodes devrait être l'objet d'une recherche.

À l'instar du regroupement des bassins élémentaires, la mosaïque de programmation réalisée par plusieurs chercheurs en ce domaine de régionalisation devrait être fédérée et harmonisée pour constituer un logiciel unique. Bien entendu, afin de parfaire l'outil de régionalisation, le couplage avec un logiciel de système d'information géographique s'impose.

**BIBLIOGRAPHIE**

- COCHONNEAU G., 1991. La méthode du vecteur régional. Mémoire explicatif de logiciel, Orstom, 200 p.
- GUYOT J.L. et GUMIEL D., 1990. Premières données sur l'hydrogéologie et sur l'hydrogéochimie du nord de l'Altiplano bolivien. *Hydrogéologie*, 159, 164.
- HIEZ G., 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers Orstom, Série Hydrologie*, XIV, 2 :129-172.
- MAHÉ G., 1992. Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse d'université Paris XI, 550 p.
- ROCHE M.A., 1988a. Evaluación del balance de radiación y de la evapotranspiración por formulas adaptadas para softwares. PHICAB : IHH-UMSA, Orstom, SENAMHI, 37 p.
- ROCHE M.A., 1988b. Climar2 : logiciel d'exploitation de données pour l'étude des variations climatologiques spatio-temporelles. PHICAB : IHH-UMSA, Orstom, SENAMHI, La Paz, 102 p.
- ROCHE M.A., BOURGES J., CORTES J., et MATTOS R., 1991. Climatology and Hydrology of the Lake Titicaca Basin. *In* : The Lake Titicaca, Ed. Dejoux et Iltis, Kluwer Academic Publishers (in press), en español : H isbol, Bolivia, 83, 104.