

<b>Zeitschrift:</b>	Ingénieurs et architectes suisses
<b>Band:</b>	116 (1990)
<b>Heft:</b>	18
<b>Artikel:</b>	Essai de caractérisation thermique, chimique et isotopique des crues en milieu aride d'altitude: L'air (Niger)
<b>Autor:</b>	Gallaire, R.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-77290">https://doi.org/10.5169/seals-77290</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## MODÉLISATION HYDROLOGIQUE EN RELIEF ACCIDENTÉ

### **ESSAI DE CARACTÉRISATION THERMIQUE, CHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES CRUES EN MILIEU ARIDE D'ALTITUDE: L'AIR (NIGER)**

**R. GALLAIRE**

ORSTOM, Département Eaux Continentales, B.P. 11416, Niamey,  
NIGER

**R. TEHET & J.Ch. FONTES**

Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Université  
Paris-Sud, Bât. 504, F91405, Orsay Cedex

**RESUME:** La séparation des différentes phases de l'alimentation d'un hydrogramme de crue par les méthodes traditionnelles de l'hydrologie est, notamment dans les lits irréguliers des oueds d'altitude, difficile. Les méthodes physico-chimiques et isotopiques précisent l'origine des eaux ; la mise en évidence de l'effet de chasse souligne le rôle des eaux précédemment stockées dans les berges et (ou) du lit alluvial.

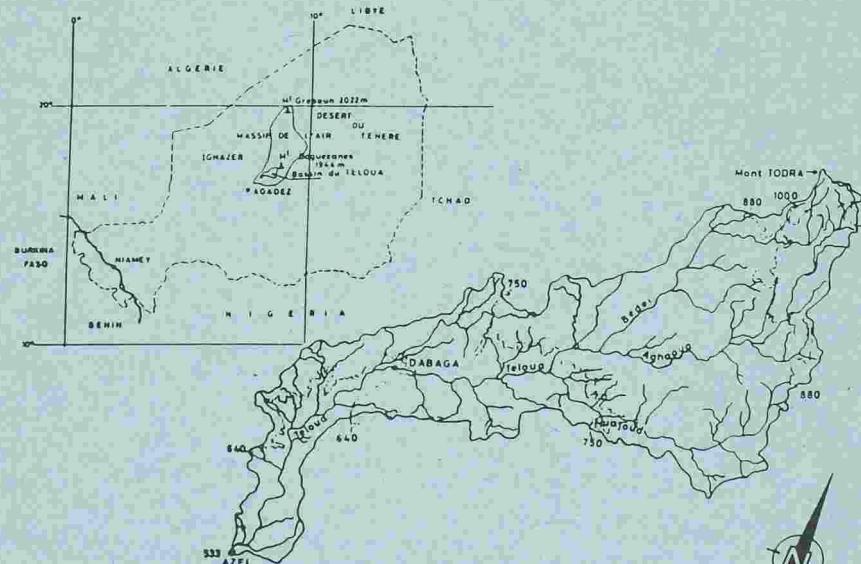


FIG. 1: Le bassin versant du Teloua.

### **INTRODUCTION.**

#### **Présentation du bassin**

Initiées dès la fin des années 1950 par l'ORSTOM, les études de bassins versants dans l'Aïr, massif montagneux du nord du Niger ( $17-20^{\circ}$ N ;  $8-9^{\circ}$ E) sont continues sur le bassin du kori (oued) TELOUA, un de ses principaux émissaires, depuis 1975 (Fig. 1).

Le bassin versant ( $1360 \text{ km}^2$  de superficie à Azel) est situé au sud-ouest du massif et comprend deux grandes parties (Fig. 2).

La partie supérieure de forme compacte, représente près de 70 % de la surface totale. Les altitudes varient de 1853 m au Mont

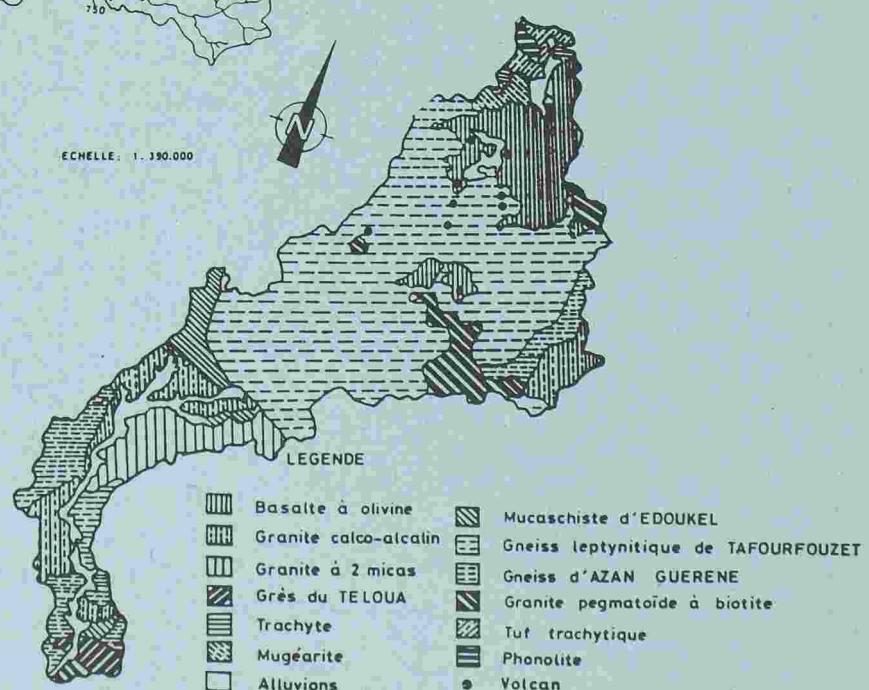


FIG. 2: Carte géologique du bassin versant du Teloua (d'après Black et al., 1967).

TADRA à 700 m environ à l'aval de la confluence des koris collecteurs de cette zone d'altitude. Les pentes sont de 10% en moyenne sur les contreforts volcaniques (trachytes, basaltes) des monts TADRA mais inférieure à 4% sur les formations en voie de démantellement de gneiss leptynitiques qui représentent 4/5 de ce haut bassin. La densité de drainage est importante et la végétation d'épineux est maigre et concentrée le long des talwegs. Ces caractères physiques expliquent la particulière aptitude au ruissellement de ce secteur en grande partie cristallin, où les dépôts alluvionnaires sont très limités.

Le bassin inférieur se présente comme une vallée d'une dizaine de kilomètres de largeur au maximum. Les pentes à l'amont sont fortes ( $7,5\%$  en moyenne jusqu'à DABAGA) avant de se radoucir ( $3\%$ ) vers la station de jaugeage d'AZEL (altitude: 526 m).

Le substratum est fait de formations leptynitiques et de granites calco-alcalins syntectoniques qui représentent la famille de roches la plus fréquente dans l'Aïr.

Le lit majeur du kori peut dépasser 100 mètres de largeur. Les épaisseurs alluvionnaires gravelo-sableuses à intercalations limoneuses sont de quelques mètres et atteignent 15-20 m à l'amont des seuils. Le profil en travers est très plat (rayon hydraulique proche de la profondeur moyenne) et les berges sont peu marquées. Un lit mineur s'inscrit parfois entre de petites terrasses engendrées par les crues faibles ou les parties finales des écoulements.

La présence de cette masse de dépôts alluvionnaire à forte porosité implique que cette partie du bassin peut intercepter et stocker une partie non négligeable des écoulements.

Dans ce milieu subdésertique, les écoulements sont saisonniers et épisodiques. Le régime des précipitations est commandé par la présence fluctuante sur cette partie septentrionale du Sahel des masses d'air antagonistes de la Zone Intertropicale de Convergence. Les précipitations sont essentiellement dues aux lignes de grains et revêtent un caractère orageux (Leroux, 1983). La saison sèche s'étale sur les mois d'octobre à mai-juin, la saison humide de mai-juin à septembre. L'évapotranspiration moyenne interannuelle varie de 4500 à 5300 mm (Roussin-Bariac, 1985).

La très grande irrégularité interannuelle de la pluviosité et des volumes écoulés a exigé un suivi sur une longue période. En 1984, la pluie moyenne sur le bassin était de 40 mm pour un écoulement à Azel de 1,2 million de m<sup>3</sup>; en 1988, 190 mm de précipitation ont engendré 49 millions de m<sup>3</sup> écoulés. Afin de préciser l'origine des débits écoulés, un suivi physico-chimique et isotopique a été mené, durant les hivernages 1988 et 1989, parallèlement aux mesures hydrologiques traditionnelles selon les techniques adoptées par plusieurs auteurs (Hubert *et al.*, 1970; Mook *et al.*, 1974; Sklash *et al.*, 1976; Fritz *et al.*, 1976; Fontes, 1980).

La température, le pH et la conductivité ont été mesurés sur le terrain et ont été complétés par la détermination de l'alcalinité et de la teneur en oxygène-18 au laboratoire.

## MÉTHODOLOGIE

Les mesures et prélevements ont été réalisés à la station d'AZEL à l'aval des échelles limnimétriques en rive gauche rocheuse du kori, à un endroit où la turbulence assure une bonne homogénéité.

Les études antérieures (Fritz *et al.*, 1974) ont montré que les signaux physico-chimiques et isotopiques pouvaient être très précoce et précéder les signaux hydrologiques. Une attention particulière a donc été portée aux phases de début de crue.

Les principaux critères de sélection des crues étudiées ont été :

- l'existence d'événements bien individualisés,
- la réalisation des mesures dès le début de l'écoulement,
- le développement suffisant de la crue en cote et en temps permettant l'apparition de différentes phases d'alimentation,
- la régularité et le nombre de points de mesures durant l'événement.

Nous ne présentons ici que les résultats de deux crues, une pour chaque hivernage : 25-27/07/88 et 13-14/08/89 (Figures 3 et 4).

## IDENTIFICATION DES DIFFÉRENTES PHASES D'ALIMENTATION DE L'HYDROGRAMME

Les moyens de caractériser les réservoirs mis en jeu par les méthodes traditionnelles de l'hydrologie sont limités. En phase de crue, les différents relais (ruisselet pur, chasse, ruissellement hypodermique différencié...) sont difficiles à distinguer. En

effet ces apports se succèdent la plupart du temps sans changement notable de pente sur l'hydrogramme. En décrue, l'investigation est plus aisée à partir de techniques comme celle des log qui permet de séparer les différentes phases d'alimentation (Fig. 5).

### L'apport des signaux physico-chimiques (Figures 3 et 4)

#### Le pH:

Dans la plupart des cas, le pH compris entre 8 et 8,5 en début de crue marque un équilibre avec le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et le système calco-carbonique. Il indique donc la venue précoce d'eaux probablement saturées en calcite. Ces eaux ont stagné au contact de l'atmosphère, ou à proximité, à travers un couvert de sédiments peu épais. La baisse marquée de 1 à 2 unités pH, qui se produit très rapidement ensuite, révèle à la fois le passage à des eaux de ruissellement pur ou issues de stockage dans les alluvions lessivées et dépourvues de cations du lit lui-même, et peut-être aussi de la zone non saturée des sols plus chargés en CO<sub>2</sub> que l'atmosphère.

Cette baisse n'est, la plupart du temps, que passagère et la remontée qui suit, jusqu'à des valeurs dépassant la neutralité, signale l'arrivée des eaux chassées des berges et davantage chargées en cations issus de l'hydrolyse des silicates. Ces dernières sont assez rapidement relayées par de nouvelles eaux, issues d'un ruissellement pur ou d'un déstockage du milieu alluvionnaire lessivé situé à l'amont; ces relais s'accompagnent d'un retour à des pH plus bas. Toutes ces

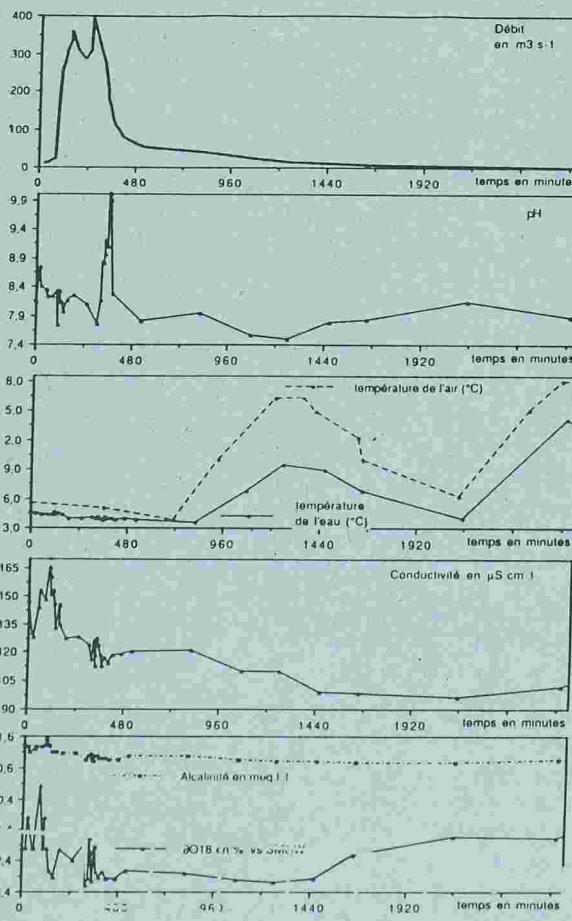


FIG. 3: Crue du 25-27.7.88.

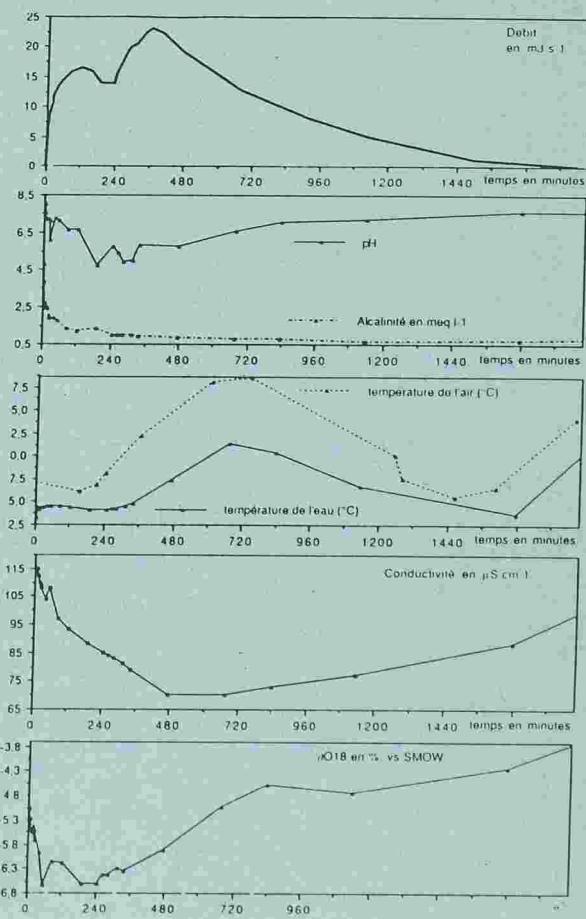


FIG. 4: Crue du 13-14.8.89.

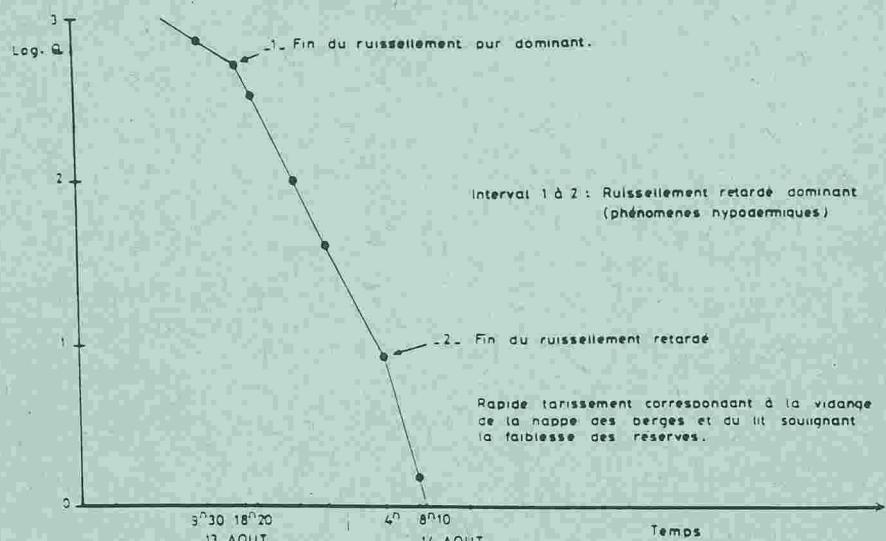


Fig. 5: Décrue et tarissement de la crue du 13-14/08/89 (échelle semi-logarithmique).

fluctuations du pH s'effectuent en phase ascendante de la crue, aucun indice ne permettant de distinguer l'existence, et à plus forte raison, l'importance de ces diverses alimentations sur l'hydrogramme.

Enfin, la remontée progressive des valeurs qui accompagnent la phase de décrue est caractéristique de l'arrivée d'eaux plus lointaines ayant connu des temps de contact de plus en plus long avec les minéraux altérés des alluvions du lit et avec l'atmosphère.

#### *La température:*

L'interprétation du signal thermique est plus délicate dans la mesure où le milieu est soumis aux fortes variations nyctémériques de température de l'atmosphère qui occultent parfois ainsi une partie de l'information.

Il a donc été nécessaire de déterminer la température moyenne des jours précédents, la température de l'air au moment de l'écoulement en particulier au début de la crue et durant le passage au maximum journalier.

L'observation des températures de l'eau en liaison avec celles de l'atmosphère fait ressortir que :

Les valeurs de début d'écoulement sont généralement en équilibre avec celles de l'atmosphère; de même les valeurs de mi-journée et de fin de nuit semblent en phase. Ce rapide équilibre des températures des deux milieux montre que les quantités d'eau emmagasinée sont faibles en particulier dans les alluvions.

L'équilibre avec l'air ambiant des premiers ruissellements est rompu par l'arrivée des eaux de chasse dont la température est plus élevée, en raison d'une meilleure conservation de la température moyenne atmosphérique des jours précédents par les eaux des berges. Le retour en proportion suffisante d'eaux de ruissellement de surface s'accompagne naturellement d'une baisse de température due à l'effet d'altitude et au fait que les précipitations se produisent le plus souvent la nuit. Au delà de quelques heures, les écoulements sont soumis aux fluctuations thermiques journalières et la détection de l'origine des contributions devient aléatoire, voire impossible par cette méthode.

#### *La conductivité:*

Les valeurs restent faibles (inférieures au  $\text{mS.cm}^{-1}$ ), ce qui apparaît normal compte tenu du milieu peu soluble qui assure le transit ou l'emmagasinement momentané des eaux, en particulier les zones les plus altérées d'où sont évacués les éléments les plus solubles. La brusque augmentation de teneur en ions qui suit les premiers temps des écoulements est à rapprocher de l'évolution des températures et des pH qui montrent la venue d'eaux chassées des berges. Celles-ci, généralement constituées de terrasses graveleuses et sableuses, représentent une zone d'emmagasinement de subsurface des eaux de crues précédentes soumises à l'action de la température diurne et de l'évaporation. Ces facteurs physiques favorisent l'hydrolyse des minéraux et leur concentration dans le milieu aquéux.

Le retour progressif à des eaux de ruissellement pur qui n'ont pas été au contact avec les minéraux solubles, s'accompagne logiquement d'une baisse très nette de la conductivité.

La fin de la décrue est généralement marquée par une remontée d'autant plus sensible que le tarissement aura été long. Ainsi, l'évaporation, en s'exerçant sur des réserves superficielles et subsuperficielles peu importantes, pourra engendrer une forte concentration en sels.

#### *L'alcalinité:*

Comme pour le pH, les valeurs de début de crue constituent une pointe qui signale l'ar-

rivée dominante d'eaux de chasses issues d'alluvions à minéraux partiellement altérés dans les terrasses qui encadrent le lit mineur. Par la suite, l'alcalinité se maintient généralement à des valeurs faibles jusqu'au tarissement. Cette évolution s'explique par la venue en proportion croissante d'eaux plus lointaines qui sont, en chaque point du trajet, postérieures à la pointe de crue et ne sont plus en contact qu'avec des alluvions lessivées du lit mineur.

#### *Intérêt des déterminations isotopiques.*

Les teneurs en oxygène-18 (isotope stable de la molécule d'eau), exprimées en ‰ vs SMOW (Standard Mean Ocean Water) précisent les scénarios établis à partir des mesures physico-chimiques.

Les eaux d'une crue précédente, partiellement emmagasinées dans la zone non saturée des berges et du lit, sont soumises à l'évaporation; leurs teneurs en isotopes lourds augmentent. Ces eaux se démarquent donc aisément d'eaux récemment précipitées et faiblement exposées à l'évaporation.

La figure 3 montre que la crue du 25-27/07/88 écoule pendant la plus grande partie du tarissement des eaux dont la teneur en oxygène-18 est très proche de la pluie: il s'agirait du ruissellement vrai. En revanche, la crue du 13-14/08/89 (Fig. 4) garde une teneur en oxygène-18 très inférieure à celle de la pluie ce qui indique clairement que l'effet de chasse est alors dominant.

## CONCLUSIONS

Les variations des paramètres physico-chimiques et chimiques permettent la mise en évidence de différentes phases d'alimentation, notamment pendant la crue. Les méthodes classiques de l'hydrologie ne les différencient pas. Leur quantification reste toutefois délicate. De telles approches ont été testées en région tempérée (Blavoux, 1978; Bakalowicz, 1979) mais leurs conditions d'application sont très spécifiques (pluie homogène et constante sur tout le bassin; teneur en oxygène-18 de celle-ci différente de plus de 3‰ de celle des eaux souterraines; signal pluie bien séparé des épisodes pluvieux précédents et suivants; ...). Ces paramètres représentent toutefois une gamme d'outils complémentaires et efficaces pour l'étude et la compréhension des mécanismes de transfert pluie-débit. Cela est en particulier le cas pour préciser les rôles de la zone non saturée et de la nappe alluviale qui paraissent jouer, dans un milieu pourtant peu favorable (réserves potentiellement faibles), un rôle non négligeable.

Tableau 1. – Teneurs en oxygène-18 des averses responsables des crues sur le bassin du Teloua.

Date	Lieu	Pluie (en mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (en ‰ vsSMOW)
22/07/88	Aouderas	8,2	-2,58
25/07/88	Azel	9,7	-2,95
	Agadez	2,7	-1,21
12/08/89	Aouderas	1,4	-2,43
	Abardok	25,1	-0,60
	Dabaga		-3,73

geable dans les écoulements de cette zone de moyenne altitude subdésertique.

## BIBLIOGRAPHIE

- BAKALOWICZ M. (1979) *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification*. Thèse Doct. ès Sci., Université Paris 6, Paris.
- BLACK R., JAUJOU M., PELLATON C. (1967) *Carte géologique de l'Aïr au 1/500 000<sup>e</sup> et notice explicative*. République du Niger, Ministère des Travaux Publics et des Transports, des Mines et de l'Urbanisme. Direction des Mines et de la Géologie.
- BLAVOUX B. (1978) *Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium*. Possi-

bilité et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse Doct. ès Sci., Université Paris 6, Paris.

FONTES J.Ch. (1980) Environmental isotopes in groundwater hydrology. In : P. Fritz and J.Ch. Fontes (eds), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, vol. 1, The Terrestrial Environment, A. Elsevier, Amsterdam, 75-140.

FRITZ P., CHERRY J.A., WEYER K. U., SKLASH M. (1976) Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions. In: *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology*, IAEA, Vienne, 111-130.

HUBERT P., MARCE A., OLIVE P., SIWERTZ E. (1970) Etude par le tritium de la dynamique des eaux souterraines. *C. R. Acad. Sci., Paris*, 270, 908-911.

LEROUX M. (1983) *Le climat de l'Afrique*. Champion ed., Paris, 2 vol.

MOOK W. G., GROENVELD D. J., BROWN A. E. & VAN GANSWIJK A. J. (1974) Analysis of a runoff hydrograph by means of natural 18O. Proc. IAEA Symp. Isot. Tech. Groundwater Hydrol., Vienna, 145-153.

ORSTOM (1960 puis 1976 à 1989) Rapports de campagne sur le bassin du Teloua. Niamey, NIGER.

ROUSSIN-BARIAC M. (1985) *Etude hydrochimique et isotopique d'une nappe alluviale sous climat semi-aride (cuvette d'Agadez Niger)*. Thèse Doct. 3<sup>e</sup> Cycle, Université Paris-Sud, Orsay.

SKLASH M. K., FARVOLDEN R. N. and FRITZ P. (1976) A conceptual model of watershed response to rainfall, developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer. *Can. J. Earth Sci.*, 13, 271-283.

## A MODULAR WATERSHED-MODELING SYSTEM FOR USE IN MOUNTAINOUS REGIONS

G.H. LEAVESLEY & L.G. STANNARD

U.S. Geological Survey, MS 412, Denver Federal Center, Lakewood, Colorado 80225, USA.

**ABSTRACT** A modular watershed-modeling system that provides a range of hydrologic-simulation and dataanalysis capabilities has been developed for use in mountainous regions. The watershed-model component is the U.S. Geological Survey's Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS). PRMS is a modular-design, physical-process based, distributed-parameter watershed model. Data-management and analysis components are provided by the U.S. Geological Survey's datamanagement program ANNIE (not an acronym). Hydrologicforecasting capabilities are provided by a modified version of the National Weather Service's Extended Streamflow Prediction (ESP) program. Other components include a digital-terrain-analysis module for use in basin characterization and parameter estimation, and a remote-sensing-applications module for incorporating remotely sensed snow-covered-area data in watershed simulations.

## INTRODUCTION

A modular watershed-modeling system is being developed and tested in a variety of mountainous regions to provide improved modeling tools and procedures that address current problems in mountain-watershed simulation. Problems in the use of distributed-parameter models in mountainous regions include: optimal subdivision and characterization of watersheds to account for the effects of slope, aspect, elevation, soils, and other watershed features on hydrologic response; extrapolation of point data to areal-value estimates in complex, high-relief terrain; verification of the simulated hydrologic response of delineated subwatershed areas; and updating of simulated watershed conditions using measured values when forecasting streamflow.

The modular system is based on the concept of a master library that contains compatible subroutines to simulate most components of the hydrologic cycle. Alternative or new simulation procedures for selected process components can be compared directly while keeping the remaining

process components the same. The use of a standard set of statistical measures, maintained within the system framework, provides a common basis on which to compare component performance. The modular concept also provides a system with operational and research modeling capabilities. The use of a standard model framework and data structure enables researchers in a variety of disciplines to develop and test model components in their areas of expertise without having to develop the entire model.

The initial system has been developed from existing software. The major components of the system are the U.S. Geological Survey's Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) (Leavesley *et al.*, 1983), the U.S. Geological Survey's interactive data-management and control program ANNIE (Lumb *et al.*, 1989), a modified version of the National Weather Service's Extended Streamflow Prediction (ESP) program (Day, 1985), a set of digital-terrain-analysis programs for use in basin characterization (Jenson & Domingue, 1988), and a set of

procedures for applying remotely sensed data to basin characterization and model analysis. Together they form a complete system that enables a user to: reduce, analyze, and prepare data for model application; simulate and forecast watershed response; and statistically and graphically analyze model results. The purpose of this paper is to provide an overview of the initial system and its application in addressing the problems of watershed modeling in mountainous regions.

## PRECIPITATION-RUNOFF MODELING SYSTEM (PRMS)

PRMS is a modular-design, physical-process based, distributed-parameter watershed model that was developed to evaluate the effects of various combinations of precipitation, climate, and land use on watershed response. Watershed response to normal and extreme rainfall and snowmelt can be simulated to evaluate changes in water-balance relations, flow regimes, flood peaks and volumes, soil-