

UN RÉSEAU D'OBSERVATION DES GLACIERS DANS LES ANDES TROPICALES

*Bernard Pouyaud *, Bernard Francou *, Pierre Ribstein **

Résumé

Par leur grande sensibilité au changement climatique, les glaciers tropicaux sont d'excellents indicateurs de l'évolution du climat et, en même temps, des objets hydrologiques susceptibles d'évoluer rapidement dans le futur. On montre que l'actuel recul accéléré des glaciers dans les Andes centrales et les conséquences qu'il peut avoir en matière hydrologique et de risques naturels rendent nécessaire un programme de surveillance de ces glaciers au niveau de toute la chaîne, ce que l'ORSTOM contribue à faire depuis 1991.

Mots-clés : *Glacier, Tropiques, Andes, changement climatique, ressources en eau, risques naturels.*

UNA RED DE OBSERVACIÓN DE LOS GLACIARES EN LOS ANDES TROPICALES

Resumen

Por su gran sensibilidad al cambio climático, los glaciares tropicales son excelentes indicadores de la evolución del clima, así como objetos hidrológicos susceptibles de una evolución rápida en el futuro. Considerando el actual retroceso acelerado de los glaciares en los Andes centrales y las consecuencias que puede tener a nivel hidrológico así como en el campo de los riesgos naturales, es necesario un programa de monitoreo de los glaciares a nivel de toda la cordillera, que es lo que ORSTOM contribuye a hacer desde 1991.

Palabras claves: *Glaciar, Trópicos, Andes, cambio climático, recursos hídricos, riesgos naturales.*

A GLACIER MONITORING NETWORK IN THE TROPICAL ANDES

Abstract

The high sensibility of Tropical glaciers to climatic forcing make it possible to use them as reliable indicators of climate evolution, as well as hydrological systems which could change rapidly in the future. Considering the present increase in glacier retreat in central Andes and the consequences induced by this evolution on water resources and natural hazards, a monitoring program at a large scale appears to be highly desirable. This has been the objective of ORSTOM since 1991.

Key words: *Glacier, Tropics, Andes, climatic change, water resources, natural hazards.*

1. POURQUOI SURVEILLER LES GLACIERS TROPICAUX ?

La sensibilité des glaciers de montagne aux variations climatiques est bien connue. On l'utilise comme un marqueur de l'évolution actuelle ou passée du climat. Particulièrement appropriée pour mettre en évidence des variations portant sur quelques décennies, voire quelques siècles, elle a permis de bien documenter le Petit Age de Glace, la dernière crue de grande ampleur survenue entre les XVI et XXème siècle. Sous les Tropiques, les glaciers étaient jusqu'à une période récente très peu connus. Des travaux publiés depuis peu (Thompson *et al.*, 1984 ; Thompson *et al.*, 1986 ; Hastenrath & Kruss 1992 ; Francou *et al.*, 1995 ; Ribstein *et al.*, 1995 ; Kaser, sous presse) ont montré qu'ils répondent avec une extrême sensibilité aux variations climatiques courtes, y compris à la variabilité interannuelle. Cette sensibilité est à mettre en relation avec deux de leurs caractéristiques : 1. Sous les basses latitudes, l'amplitude thermique annuelle est inférieure à 5 °C et les parties inférieures des langues glaciaires sont toute l'année en régime d'ablation, de telle sorte que l'évolution du bilan en fonction de l'altitude (coefficient d'activité) est de valeur élevée ; aussi, les glaciers sont-ils généralement d'une faible longueur (moins de 5 km) et les fronts réagissent-ils avec un délai bref par une avancée ou un recul en fonction de la tendance du bilan, surtout lorsque la zone d'accumulation est peu élevée et de taille réduite ; 2. Les précipitations étant liées au passage de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), la saison d'accumulation survient pendant la période où le glacier reçoit le maximum d'énergie radiative, ce qui se traduit par une ablation maximale dans la zone basse du glacier ; de là on comprend que la variabilité des précipitations une année sur l'autre ait des conséquences importantes sur le bilan du glacier, à la fois en terme d'accumulation et d'ablation. La réponse des glaciers tropicaux aux variations du climat dépend cependant du milieu. Dans les régions humides où les précipitations dépassent 800/900 mm an⁻¹ et tombent en 6 mois et plus, une tendance à l'augmentation de la température agit à la fois par le flux de chaleur directement apporté par le rayonnement et le flux de chaleur sensible associé à l'élévation de la limite pluie/neige sur le glacier. On s'attend donc à une forte réaction des glaciers, ce qui est le cas au Pérou en Cordillère Blanche (Lliboutry *et al.*, 1977a). Par contre, dans les régions sèches avec des précipitations inférieures à 500 mm an⁻¹ tombant en moins de 4 mois, les précipitations sont le principal facteur limitant dans le bilan : les derniers glaciers ne se rencontrent qu'à plus de 5 500 m, c'est-à-dire à une altitude où l'augmentation simultanée du rayonnement et de la sublimation doit être compensée par les basses températures : c'est le cas en Bolivie au Sud du 19°S où les glaciers disparaissent au profit du permafrost.

Dans les Andes tropicales, la variabilité climatique la plus marquée est celle qui est associée aux événements ENSO (El Niño Southern Oscillation).

2. L'ENREGISTREMENT PAR LES GLACIERS DES ANDES TROPICALES DES PHÉNOMÈNES ENSO

Depuis le carottage réalisé dans la Calotte glaciaire de Quelccaya (Thompson *et al.*, 1984), on sait que les phases négatives de l'Oscillation Sud (phénomènes ENSO) se traduisent sur les glaciers du Sud du Pérou et de Bolivie par une diminution de l'accumulation à haute altitude. Observation cohérente avec les analyses faites sur les séries d'un échantillonnage de stations météorologiques du Pérou et de Bolivie montrant une baisse systématique, et plus ou moins marquée en fonction de l'intensité de ces événements, des précipitations en période

ENSO (Francou & Pizarro, 1985 ; Ronchail, 1996). Récemment, on a constaté sur des séries d'une vingtaine d'années, mesurées ou reconstituées, que les bilans des glaciers sont systématiquement négatifs lors de la phase négative de l'ENSO, ce qui a permis de bien mettre en évidence le rôle déterminant des températures dans le contrôle du bilan de masse (Ribstein *et al.*, 1995 ; Francou *et al.*, 1995) : en période ENSO, dans les hautes Andes du Pérou et de Bolivie, les températures varient positivement, d'une valeur minimum d'un écart-type lors des événements marquants (Francou *et al.*, 1996). Ce réchauffement concerne températures maximales et températures minimales et il est à mettre en relation avec l'anomalie chaude qui affecte l'océan et une grande partie de troposphère tropicale en phase négative de l'oscillation sud, particulièrement dans le Pacifique Est. Il est à noter cependant que la variabilité climatique associés aux événements ENSO n'explique pas à elle seule la tendance négative persistante des bilans depuis quelques décennies, et que d'autres facteurs sont à identifier.

La première question qui se pose est de cadrer l'extension géographique de l'influence de l'ENSO sur les glaciers de l'aire andine, c'est-à-dire de savoir si les bilans de masse négatifs qui lui sont associés se retrouvent dans les Andes du Nord, Équateur et Colombie, question jusqu'à présent sans réponse faute de données recueillies sur ces glaciers. Dans les Andes subtropicales du Chili, on sait par contre que les bilans glaciaires sont positifs en phase négative de l'ENSO, en relation avec l'activation de la cyclogénèse sous les latitudes moyennes du Pacifique qui "dope" les précipitations neigeuses d'hiver (Escobar *et al.*, 1996). La seconde question, c'est de savoir qu'elle est l'importance relative des événements ENSO dans le recul des glaciers des Andes tropicales qui est actuellement dans une phase accélérée depuis le début des années 1980.

3. LES GLACIERS ANDINS COMME MARQUEURS D'UN CHANGEMENT CLIMATIQUE EN COURS RAPIDE

On dispose de peu d'informations sur l'évolution de la longueur des glaciers andins tropicaux et de leur bilan sur une durée assez longue pour que la tendance soit considérée comme significative, c'est-à-dire une vingtaine d'années. Les données existantes sur les mouvements des fronts de glaciers de calotte ou de glaciers de taille modeste aussi bien au Pérou (Brecher & Thompson, 1993 ; Hastenrath & Ames, 1995 ; Ames & Francou, 1995 ; Portocarrero, 1996) qu'en Bolivie (Francou & Ribstein, 1995) montrent que les reculs se sont nettement accélérés depuis 1980 par rapport aux décennies précédentes. Le recul mesuré a été 3 fois plus rapide après 1980 que dans la décennie antérieure au Pérou ; sur le glacier de Chacaltaya en Bolivie, il a été 5 fois plus rapide après 1980 que pendant les 4 décennies qui ont précédé. La tendance semble identique sur les glaciers équatoriens d'après les premières données récemment recueillies sur l'Antisana (Francou, non publié). Certes, il y a eu dans la période récente une succession d'événements ENSO marquants (1982-1983, 1991-1992, 1987-1988) qui ont précipité le recul, mais on constate que les bilans mesurés ou reconstitués ont été presque toujours négatifs depuis le début des années 1980, à de rares exceptions près comme 1985-1986 (Ribstein *et al.*, 1995). De plus, cette même tendance est observable ailleurs sur les Tropiques, comme par exemple sur le glacier Lewis au Kenya (Hastenrath & Kruss, 1992). Comme l'indiquent les modèles réalisés au Kenya (Hastenrath, 1989 ; Hastenrath & Kruss, 1992), ou en cours en Bolivie sur le glacier Zongo (Ribstein *et al.*, 1996), la relation climat/glacier est complexe et le rôle des températures ne peut être saisi qu'au terme de la

réalisation d'un bilan énergétique complet à la surface du glacier associant aux flux radiatifs d'autres variables importantes, comme l'humidité.

4. UN PROGRAMME RÉGIONAL INTÉGRÉ VISANT À ESTIMER SUR LA DURÉE LES BILANS (GLACIOLOGIQUES/HYDROLOGIQUES) ET À COMPRENDRE LES PROCESSUS

On a déjà beaucoup insisté sur l'intérêt de disposer à l'échelle mondiale d'un système d'information sur les tendances des glaciers de montagne, bilans de masse et évolution des langues (Haerberli, 1995). Étendre les réseaux déjà existants en direction des Tropiques et de l'Hémisphère Sud est une priorité que s'est donné le Word Glacier Monitoring System (IAHS-ICSI). Dans le cas d'une chaîne de montagne vaste et d'orientation méridienne comme les Andes, très sensible aux perturbations majeures induites par les événements ENSO, il y a un intérêt particulier à disposer d'un réseau de surveillance des glaciers de l'Équateur en direction des hautes latitudes. Ainsi l'ORSTOM a-t-il entrepris depuis 1991 la mise en place d'un programme intégré au niveau des Tropiques andins. L'équipement de glaciers-tests choisis pour leur situation représentative et leur intérêt hydrologique a commencé en Bolivie (Fig. 1). Un type d'équipement a été défini et mis en place sur le glacier de Zongo, un glacier de 2,1 km² situé en Cordillère Royale, servant à estimer le bilan de masse (Franco *et al.*, 1995) : un réseau de balises a été installé dans la zone d'ablation. Dans la partie haute du glacier, des balises, des puits à neige, et des carottages permettent d'estimer l'accumulation. Une mesure des vitesses superficielles de la glace sur la langue d'ablation à partir des balises de bilan est effectuée chaque année, en même temps qu'un relevé par topographie de la position du front. Ce dispositif dit *standard* est doublé d'un équipement permettant d'estimer le bilan hydrologique du glacier, avec un ensemble de pluviomètres totalisateurs dispersés à proximité du glacier jusqu'à l'altitude de la ligne d'équilibre et une station limnigraphique sur l'émissaire à proximité du front. Des stations météorologiques complètent le dispositif, qui comprennent des thermographes pour déterminer les gradients locaux. Un dispositif plus léger existe sur le Glacier de Chacaltaya, proche du précédent, dont la taille plus réduite permet un suivi glaciologique très fin (Franco & Ribstein, 1995).

L'ORSTOM a entrepris l'installation de dispositifs identiques sur des glaciers équatoriens comme l'Antisana 15(a) situé sous l'équateur (Fig. 1). Parallèlement des glaciers de la Cordillère Blanca sont peu à peu équipés du "dispositif standard", comme le glacier Artesonraju, un nouveau glacier situé dans le bassin versant très englacé de Parón, au Nord de la cordillère, ou les glaciers Yanamarey et Urushraju au Sud, équipés et suivis depuis 1977 par l'*Oficina de Recursos Hídricos de Huaraz* (Ames, 1985) (Fig. 1).

Localement, pour comprendre les processus et en liaison avec des applications hydrologiques, ont été mis en place des équipements plus lourds visant à déterminer un bilan énergétique à la surface du glacier et à aboutir sur cette base à une modélisation de l'écoulement des eaux de fonte (exemple sur le glacier de Zongo) (Rigaudière *et al.*, 1995 ; Ribstein *et al.*, 1996). Une fois mis au point, ces modèles aideront à préciser des scénarios possibles pour les utilisateurs de l'eau, en fonction de changements climatiques prévisibles affectant les volumes de glace en présence.

Comme modeste pendant de ce programme dans les zones arides andines sans glaciers, l'ORSTOM poursuit depuis 1992 dans la partie altiplanique de la deuxième région

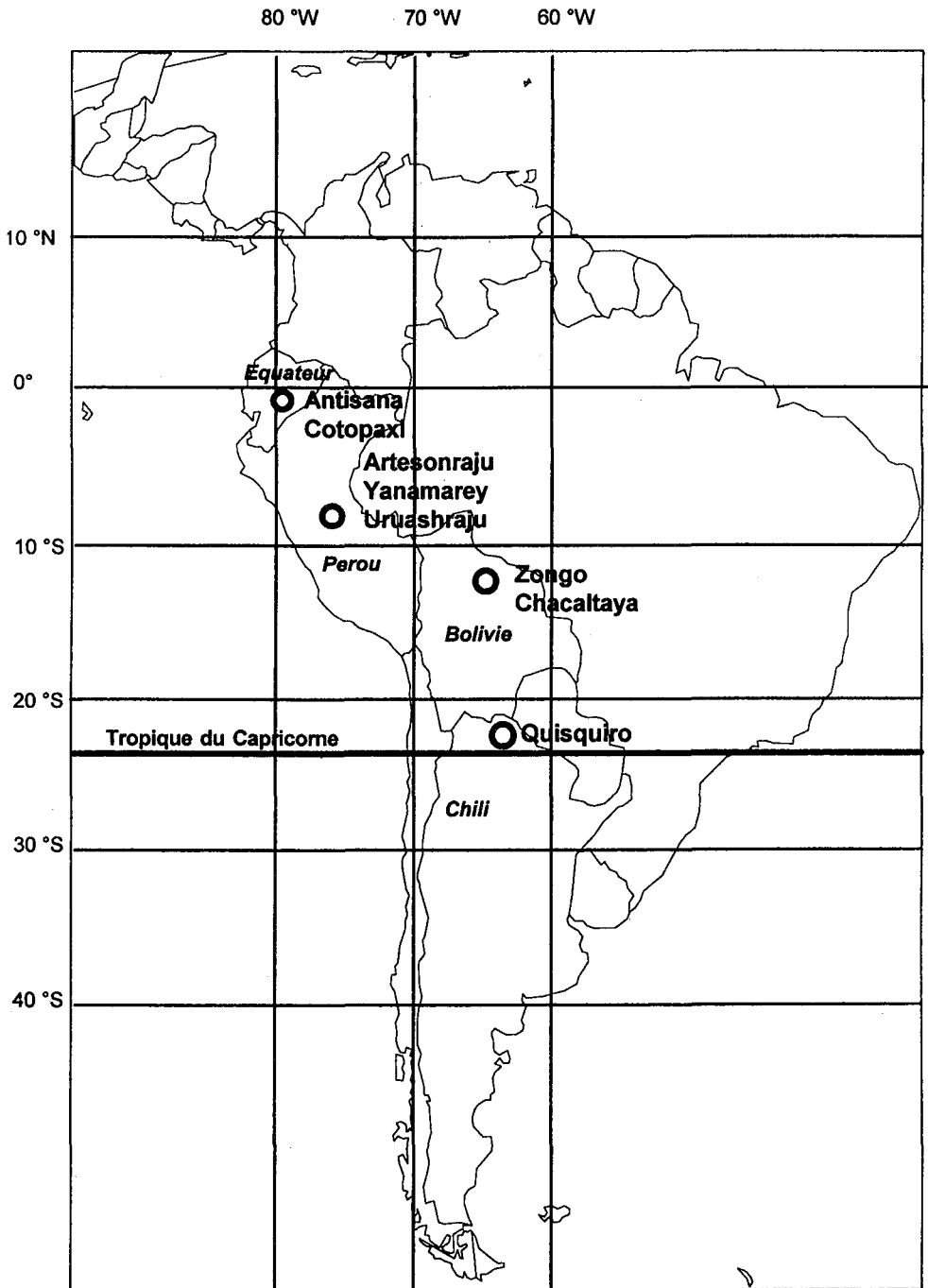


Fig. 1 - Sites étudiés par l'ORSTOM (en collaboration avec ses partenaires régionaux) dans le cadre de son programme d'étude des neiges et des glaciers tropicaux le long de l'axe andin.

chilienne une étude sur "Les neiges, les eaux souterraines et les changements climatiques de l'Altiplano nord-chilien". Des sources, représentatives des différents environnements géologiques et climatiques, ont été suivies sur plusieurs cycles annuels et caractérisées aux plans chimiques et isotopiques. Une étude isotopique simultanée des précipitations d'altitude, essentiellement neigeuses, montre que la réalimentation actuelle des nappes est en règle générale insignifiante, ce que confirment les datations faites sur les eaux de certains rios qui apparaissent anciennes (5 000 ans et plus). Des moraines, qu'il s'agit encore de dater mais qui paraissent relativement récentes, ont été trouvées à près de 5 000 m d'altitude dans d'anciens complexes volcaniques au voisinage de la frontière bolivienne. Enfin une station climatologique automatique a été installée à Quisquiro (Fig. 1), dans une zone d'altitude où manquaient les observations climatologiques fiables.

La gestion des équipements mis en place pour le long terme ne peut se faire que dans le cadre d'un partenariat étroit opérant sur place. Le choix s'est porté naturellement sur les gestionnaires de l'eau, universités, bureaux d'étude du secteur public ou privé, et sur les secteurs travaillant dans la prévention des risques naturels liés aux glaciers. D'où la nécessaire orientation de ce programme régional vers des objectifs appliqués.

5. LES APPLICATIONS DIRECTES : LA RESSOURCE EN EAU D'ORIGINE GLACIAIRE ET NIVALE, ET LES RISQUES NATURELS ASSOCIÉS AUX GLACIERS

De nombreux glaciers tropicaux ont un rôle déterminant dans le régime hydrologique des bassins versants en régularisant les débits, venant pallier ainsi l'irrégularité saisonnière des précipitations (soutien aux débits d'étiage) et la variabilité interannuelle des pluies (en partie liée aux situations ENSO dans une grande partie des Andes centrales). Il faut rappeler que 3 grandes capitales dépendent partiellement de ces apports glaciaires pour leur alimentation en eau (La Paz, Quito, Lima), et que sur le versant Pacifique des Andes ou à l'intérieur de la chaîne existent de vastes zones arides ou subarides qui doivent leur développement à des apports glacio-nivaux (plusieurs vallées centrales d'Équateur, le littoral du Pérou, les 3 régions nord du Chili). Dans ce contexte, tout programme glaciologique doit intégrer étroitement une recherche sur l'origine et l'évolution des ressources en eau. Dans les 4 secteurs où opère l'ORSTOM, des programmes visant à évaluer les apports glaciaires/nivaux dans les hauts bassins versants andins sont en cours de développement, venant en complément des études faites sur les glaciers eux-mêmes.

Les Andes étant dans beaucoup de secteurs une chaîne touchée par le risque sismique et volcanique, les glaciers jouent le rôle d'amplificateurs de ces risques naturels. En Cordillère Blanche, la multiplication des lacs proglaciaires depuis l'accélération du recul a accru les risques de vidanges catastrophiques par avalanches de glace ou éboulement rocheux dans ces lacs barrés le plus souvent par des digues morainiques fragiles (Lliboutry *et al.*, 1977b). Ces avalanches, accompagnées ou non de vidanges, ont provoqué des dégâts considérables et plusieurs dizaines de milliers de morts au cours de ce siècle. Ce sont elles qui ont suscité le début des études glaciologiques dans cette cordillère (Ames & Francou, 1995). Des travaux importants ont été réalisés pour assurer la sécurité de ces lacs, couplés récemment avec des équipements permettant leur utilisation comme réservoirs de stockage de l'eau pour régulariser le débit des rivières situées en aval (Portocarrero, 1996). Cette fonction nouvelle des lacs glaciaires rend encore plus nécessaire les programmes d'étude glaciohydrologiques,

et c'est dans cet esprit qu'a été choisi, comme nouveau programme, la surveillance du glacier Artesonraju dans le bassin versant de Parón. En Équateur, la calotte de l'Antisana est située sur le versant amazonien des Andes, mais ses eaux sont captées en direction de Quito pour l'approvisionnement en eau potable de la ville. Dans le même temps, il s'agit d'un volcan actif qui pourrait, une fois entré en éruption, émettre des lahars en direction des zones habitées, reproduisant un scénario comparable à celui de la catastrophe du Nevado del Ruiz en Colombie en 1985. Autre glacier susceptible de connaître ce type d'événement, le Cotopaxi, dont un glacier du versant nord a été également équipé d'un réseau de balises de bilan en 1994.

6. CONCLUSION

Les glaciers sont parmi les marqueurs du climat les plus sensibles. Sous les basses latitudes, même si les glaciers représentent des volumes de glace modestes, ils sont répartis sur les 3 grandes aires principales, Amérique, Afrique et Indonésie. Leur suivi offre la possibilité de disposer d'un diagnostic en temps réel de l'évolution climatique globale au niveau de la moyenne troposphère tropicale. L'intérêt de ce suivi est renouvelé par des études récentes montrant que la température de la zone tropicale a sans doute été, lors des grands changements climatiques, beaucoup moins stable qu'on le pensait il y a une quinzaine d'années, notamment lorsque s'est mis en place le Climate Mapping Project (CLIMAP). Les résultats obtenus récemment par Thompson *et al.* (1995) au Huascarán sont à citer parmi ceux qui montrent que les températures ont varié lors des grands événements glaciaires et depuis lors selon une amplitude tout à fait comparable à celle connue sous les moyennes et hautes latitudes. Si tel est le cas, il est probable que les Tropiques réagiront à un changement climatique futur par un réchauffement plus marqué que celui qui est prévu dans les modèles en cours, tendance que des marqueurs continentaux très sensibles comme les glaciers devraient être les premiers à enregistrer. Un recul rapide des glaciers, particulièrement s'il a lieu dans un contexte plus sec ou caractérisé par une variabilité plus grande des précipitations, aurait des conséquences importantes sur les ressources en eau, notamment dans les Andes et sur leur périphérie. Ces arguments renforcent l'intérêt d'un suivi glacio-hydrologique intégré au niveau de toute la zone tropicale.

Références citées

- AMES, A., 1985 - *Estudio de mediciones glaciológicas efectuadas en la Cordillera Blanca por ELECTROPERÚ S.A.: variaciones y balance de masas de los glaciares y su contribución en el caudal de las cuencas*, 81p., Grenoble: Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, CNRS.
- AMES, A. & FRANCOU, B., 1995 - Cordillera Blanca, Perú. Glaciares en la Historia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(1) : 37-64.
- BRECHER, H.H. & THOMPSON, L.G., 1993 - Measurement of the retreat of Qori Kalis Glacier in the Tropical Andes of Peru by photogrammetry. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 59, 6 : 1017-1022.
- ESCOBAR, F., CASASSA, G. & POZO, V., 1996. - Variaciones de un glaciar de montaña en los Andes de Chile en las últimas dos décadas. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(3) : 683-695, Actes du Séminaire Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales, La Paz: Ed. Ribstein *et al.*

- FRANCOU, B. & PIZARRO, L., 1985 - El Niño y la sequía en los Altos Andes Centrales (Perú y Bolivia). *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **14(1-2)** : 1-18.
- FRANCOU, B., RIBSTEIN, P., TIRIAU, E. & SARAVIA, R., 1995 - A Monthly balance and water discharge on an intertropical glacier. The Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *Journal of Glaciology*, **41**, **137**: 61-67.
- FRANCOU, B. & RIBSTEIN, P., 1995 - Glaciers et évolution climatique dans les Andes boliviennes. Glacier de Zongo et Glacier de Chacaltaya, Cordillère Royale, 16° Sud. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **24(1)** : 23-36.
- FRANCOU, B., RIBSTEIN, P., SEMJOND, H., PORTOCARRERO, C. & RODRÍGUEZ, A., 1996 - Balances glaciares y clima en Bolivia y Perú. Impactos de los eventos ENSO. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **24(3)** : 661-670, Actes du Séminaire Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales, La Paz: Ed. Ribstein *et al.*
- HAEBERLI, W., 1995 - Glacier fluctuations and climate change detection - Operational elements of a worldwide monitoring strategy. *World Meteorological Organization Bulletin*, **44**, **1** : 23-31.
- HASTENRATH, S., 1989 - Ice flow and mass change of Lewis Glacier, Mount Kenya, East Africa: observations 1974-86, modelling, and prediction to the year 2000 A.D. *Journal of Glaciology*, **35**, **121** : 325-332.
- HASTENRATH, S. & KRUSS, P.D., 1992 - The dramatic retreat of Mount Kenya's glaciers between 1963 and 1987: greenhouse forcing. *Annales of Glaciology*, **16** : 127-134.
- HASTENRATH, S. & AMES, A., 1995 - Recession of Yanamarey Glacier in Cordillera Blanca, Peru, during the 20th century. *Journal of Glaciology*, **41**, **137** : 191-196
- KASER, G., 1996 - Some notes on the behaviour of Tropical Glacier. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **24(3)** : 671-681, Actes du Séminaire Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales, La Paz: Ed. Ribstein *et al.*
- LLIBOUTRY, L., MORALES ARNAO, B. & SCHNEIDER, 1977a - Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. III. Study of the moraines and mass balance at Safuna. *Journal of Glaciology*, **18**, **79** : 275-290.
- LLIBOUTRY, L., MORALES ARNAO, B., PAUTRE, A. & SCHNEIDER B.M., 1977b - Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. 1. Historical failure of morainic dams, their causes and prevention. *Journal of Glaciology*, **18**, **79** : 239-254.
- PORTOCARRERO, C., 1996 - Retroceso de glaciares en el Perú: consecuencias sobre los recursos hídricos y los riegos geodinámicos. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **24(3)** : 697-706, Actes du Séminaire Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales, La Paz: Ed. Ribstein *et al.*
- RIBSTEIN, P., TIRIAU, E., FRANCOU B. & SARAVIA, R., 1995 - Tropical climate and glacier hydrology. A case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*, **165** : 221-234
- RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., RIGAUDIÈRE, P. & SARAVIA, R., 1996 - Variabilité climatique et modélisation hydrologique du Glacier Zongo, Bolivie. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **24(3)** : 639-649, Actes du Séminaire Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales, La Paz: Ed. Ribstein *et al.*
- RIGAUDIÈRE, P., RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. & SARAVIA, R., 1995 - Un modèle hydrologique du Glacier de Zongo, 90p., ORSTOM-Bolivie: Rapport N° 44.
- RONCHAIL, J., 1996. Variabilidad de las precipitaciones en Bolivia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **24(3)** : 369-378, Actes du Séminaire Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales, La Paz: Ed. Ribstein *et al.*
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E. & MORALES ARNAO, B., 1984 - El Niño Southern Oscillation events recorded in the stratigraphy of the Tropical Quelccaya ice cap, Peru. *Science*, **22** : 50-53.
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E., DANSGAARD, W. & GROOTES, P.M., 1986 - The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya Ice Cap. *Science*, **234** : 361-364.
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E., DAVIS, M.E., LIN, P.N., HENDERSON, K.A., COLE DAI, J., BOLZAN, J.F. & LIU, B., 1995 - Late Glacial stage and Holocene Tropical ice core records from Huascarán, Peru. *Science*, **269** : 46-50.